



UNIwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH
W BYDGOSZCZY

ROZPRAWY NR 140

Katarzyna Borowska

SELEN W GLEBIE I ROŚLINACH W WARUNKACH ZRÓŻNICOWANEGO NAWOŻENIA ORGANICZNEGO I MINERALNEGO

BYDGOSZCZ – 2010

REDAKTOR NACZELNY
prof. dr hab. inż. Janusz Prusiński

REDAKTOR DZIAŁOWY
prof. dr hab. inż. Małgorzata Zalewska

OPINIODAWCY
prof. dr hab. inż. Stanisław Baran
prof. dr hab. Zofia Spiak

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

© Copyright
Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego
Bydgoszcz 2010

ISSN 0209-0597

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

Wyd. I. Nakład 120 egz. Ark. aut. 7,0. Ark. druk. 6,7.
Oddano do druku i druk ukończono w kwietniu 2010 r.
Multigraf s.c., ul. Bielicka 76c, 85-135 Bydgoszcz

Spis treści

1. WSTĘP I CEL BADAŃ	5
2. MATERIAŁ I METODY BADAŃ	11
2.1. Materiał glebowy i roślinny	11
2.2. Warunki pogodowe	13
2.3. Analiza chemiczna materiału glebowego i roślinnego	15
2.4. Analiza statystyczna	19
3. WYNIKI BADAŃ	20
3.1. Podstawowa charakterystyka gleby	21
3.2. Zawartość selenu ogółem w glebie	22
3.3. Zawartość poszczególnych frakcji selenu w glebie	28
3.4. Udział poszczególnych frakcji selenu w całkowitej zawartości tego pierwiastka	34
3.5. Aktywność enzymatyczna gleby	38
3.5.1. Aktywność dehydrogenazowa	38
3.5.2. Aktywność peroksydaz	44
3.5.3. Aktywność katalazy	49
3.6. Dynamika aktywności badanych enzymów glebowych w zmianowaniu	54
3.7. Zależność między zawartością selenu w glebie a jej aktywnością enzymatyczną oraz podstawowymi właściwościami	57
3.8. Zawartość selenu w roślinach	63
3.9. Współczynniki bioakumulacji (BC) i translokacji (TC) selenu dla badanych gatunków roślin	69
3.10. Zawartość selenu w częściach konsumpcyjnych badanych gatunków roślin	72
4. DYSKUSJA	76
5. WNIOSKI	89
LITERATURA	91
STRESZCZENIA	105

1. WSTĘP I CEL BADAŃ

Istotna fizjologicznie i potencjalnie toksykologiczna rola związków selenu w żywieniu człowieka powoduje, że od lat pierwiastek ten jest przedmiotem badań naukowych. Początkowo przeważał pogląd, że selen jest pierwiastkiem toksycznym i kancerogennym. Schwartz i Folz (za Zacharą i in. [2007]) wykazali natomiast, że zapobiega on martwiczemu zwyrodnieniu wątroby u szczurów z niedoborem witaminy E. W metabolizmie człowieka i zwierząt bierze udział w procesach zmiatania reaktywnych form tlenu, reguluje stężenie tyroksyny, korzystnie wpływa na układ immunologiczny organizmu, a także chroni DNA przed uszkodzeniami oksydacyjnymi spowodowanymi przez mutageny i kancerogeny [Navarro-Alarcón i López-Martinez 2000, Rayman 2000, Tapiero i in. 2003, Gromadzińska i in. 2007]. Selen jest wbudowywany do łańcucha polipeptydowego przez selenocysteinę; za jej włączenie do białek odpowiedzialny jest kodon UGA [Gromadzińska i in. 2007, Papp i in. 2007]. W organizmach ssaków określono około 30 selenobiałek, z których największą grupę stanowią peroksydazy glutationowe, reduktazy tioredoksyny oraz selenobiałko P, biorące udział w procesach ochrony komórek przed skutkami działania nadtlenków [Brown i Arthur 2001, Zwolak i Zaporowska 2005, Papp i in. 2007].

Niedobór selenu w diecie człowieka może przyczyniać się do powstawania wielu chorób, np. endemicznego zwyrodnienia mięśnia sercowego (choroba Keshan) [Cao i in. 2001, Wang i Gao 2001, Abrahams 2002, Tan i in. 2002], nowotworów złośliwych czy chorób sercowo-naczyniowych [Whanger 2002, Ellis i Salt 2003, Hartikainen 2005a, Wąsowicz i in. 2007, Zachara i in. 2007]. U zwierząt niska zawartość selenu w paszy jest przyczyną m.in. pokarmowej dystrofii mięśni (u przeżuwaczy i świń), zwyrodnienia wątroby, degeneracji mięśnia sercowego i skazy wysiękowej u drobiu [Mayland 1994, Maas 1998, Dębski 2007]. Wielu autorów wskazuje również na toksyczne następstwa nadmiaru selenu, który powoduje tzw. chorobę alkaliczną, a także zmiany nowotworowe u zwierząt [Maas 1998, Kabata-Pendias i Pendias 1999, Kim i Mahan 2001]. Rola selenu zaznacza się więc szczególnie wyraźnie w końcowych ogniwach łańcucha pokarmowego, gdyż zarówno niedobór, jak i nadmierna koncentracja tego pierwiastka w roślinach paszowych mogą powodować objawy chorobowe u zwierząt i ludzi. Konieczna jest dlatego znajomość występowania selenu w ogniwach wcześniejszych – glebach i roślinach.

Zawartość selenu w glebach waha się od ilości deficytowych do silnie toksycznych z punktu widzenia potrzeb żywieniowych zwierząt. Zasobność gleb w ten pierwiastek zależy od rodzaju skały macierzystej, intensywności procesów wymywania i jego przemieszczania się z utworów skalnych do zbiorników wodnych, a także od procesów sorbowania przez tlenki żelaza i minerały ilaste gleby [Bisbjerg 1972, Gissel-Nielsen i in. 1984, Pyrżyńska 2002]. Większe ilości selenu stwierdzono na ogół w glebach bogatych w związki żelaza i substancję organiczną oraz w glebach zasolonych, a najmniejsze – w glebach kwaśnych

wytworzonych z materiału zwałowego [Mayland 1994, Kabata-Pendias 1998]. Badania dotyczące rozmieszczenia selenu w glebach uprawnych prowadzono m.in. w USA, Irlandii, Japonii, Kanadzie, Wenezueli i Indiach, gdzie stwierdzono występowanie terenów nazywanych „provincjami selenowymi” [Allaway 1968, Bisbjerg 1972, Gissel-Nielsen 1998]. Gleby tych obszarów odznaczają się odczynem alkalicznym i zawartością selenu nawet do 1200 mg·kg⁻¹.

W większości gleb na świecie zawartość selenu jest niska [Hamdy i Gissel-Nielsen 1976, Ylärinta 1985, Cieśla i in. 1994, Kabata-Pendias i Pendias 1999, Stadlober i in. 2001, Borowska 2002, Cartes i in. 2005, Fordyce 2005, Broadley i in. 2006, Pyrżyńska 2007]. Z dostępnych danych literaturowych wynika, że jego deficyt stwierdza się głównie na obszarach Chin, Nowej Zelandii, w krajach skandynawskich [Ylärinta 1985, 1990, Hartikainen i in. 2000, Mäkelä-Kurtto i Sippola 2002, Hartikainen 2005b] oraz w Turcji [Beytut i in. 2002]. Zbyt niskie ilości selenu w glebach, głównie krajów skandynawskich, związane są z przesortowaniem materiału polodowcowego przez wody i wiatr oraz wyługowaniem skał macierzystych gleb z tego pierwiastka w procesach geologicznych.

Na obszarach o klimacie umiarkowanym, z dużą ilością opadów i przewadze gleb kwaśnych, mogą występować niedobory selenu, powodujące problemy zdrowotne [Badora 2000, Zachara i in. 2001, Wąsowicz i in. 2003]. Ocena zasobności gleb Polski w ten pierwiastek dokonywana była do tej pory w sposób selektywny. Z dotychczasowych badań wynika, że zawartość selenu w poszczególnych rodzajach i gatunkach gleb była wyraźnie uzależniona od zawartości części spławialnych. Najniższe zawartości stwierdzono w glebach powstałych z piasków luźnych i słabo gliniastych. Bardziej zasobne okazały się gleby utworzone z piasków gliniastych oraz glin lekkich i średnich, a najwyższą zawartość tego pierwiastka wykazano w glebach utworzonych z glin ciężkich i iłów [Piotrowska 1984, Zablocki 1990, Dudka 1992]. W intensywnie użytkowanych rolniczo glebach Polski północno-wschodniej stwierdzono niskie zawartości selenu, natomiast wysokie występowały jedynie w glebach organicznych Pradoliny Wisły oraz w poziomach próchnicy nadkładowej gleb leśnych północno-zachodniej części Borów Tucholskich, południowej części sandrów Brdy, a także w części piasków wydmyowych gleb leśnych Puszczy Bydgoskiej [Borowska i in. 1994, 2003, 2004, Cieśla i in. 1994, Borowska 1995, Borowska i Koper 2007].

Występowanie selenu na kilku stopniach utlenienia: -II, 0, IV, VI powoduje jego odmienne zachowanie w środowisku glebowym oraz powstawanie różnych form mobilnych [Kabata-Pendias i Pendias 1979, 1999, Gissel-Nielsen i in. 1984, Kabata-Pendias 1994, Gissel-Nielsen 1998, Hesterberg 1998, Sharmasarkar i Vance 2002, Hagarova i in. 2005, Broadley i in. 2006, Pyrżyńska 2007]. Najczęściej powstające podczas wietrzenia selenki są formami mobilnymi, ulegającymi szybko sorpcji, szczególnie przez minerały ilaste, tlenki żelaza i substancję organiczną, wskutek czego stają się trudno dostępne dla roślin. Selenki występują głównie w glebach kwaśnych, oglejonych, z dużą zawartością substancji organicznej, w warunkach silnie redukcyjnych. Selen elementarny, odporny na procesy utleniania i redukcji, należy do najbardziej stabilnych form

selenu w środowisku redukcyjnym. Seleniany(IV) występują w glebach o odczynie obojętnym, o średnich właściwościach oksydacyjnych oraz wyrównanych stosunkach wodno-powietrznych. Są one łatwo sorbowane przez uwodnione tlenki żelaza i glinu oraz substancję organiczną, przy określonych właściwościach gleby mogą tworzyć kompleksy nierozpuszczalne. W obecności specyficznych bakterii, charakterystycznych dla środowiska kwaśnego, seleniany(IV) dość łatwo i szybko ulegają redukcji do selenu elementarnego. Seleniany(VI) należą do najbardziej mobilnych form selenu i przeważają w glebach alkalicznych o dużym potencjale oksydacyjnym. Nie tworzą związków z żelazem i nie są na ogół sorbowane. Formy te są łatwo rozpuszczalne w wodzie i dzięki temu są intensywnie pobierane przez rośliny. Selen często występuje w glebie w połączeniach organicznych, stanowi więc ważną część geochemicznego obiegu selenu w środowisku. Jest wbudowany do białek przez aminokwasy siarkowe, gdzie podstawiany jest w miejsce siarki [Axley i Stadtmann 1989, Stadtmann 1990]. O przemianach związków selenu w środowisku decydują reakcje redukcji i utleniania przeprowadzane w procesach mikrobiologicznych przez bakterie, grzyby i rośliny wyższe. Na szczególną uwagę zasługuje zdolność mikroorganizmów do metylacji związków selenu. Powstały dimetyloselenek ulatniając się do atmosfery powoduje straty selenu z gleby, może to mieć jednak pozytywny wpływ na gleby z nadmiarem tego pierwiastka [Haygarth i in. 1993, Haygarth 1994].

Pierwiastki śladowe tworzą z fazą stałą gleby połączenia o różnej trwałości, a ich dostępność dla roślin i możliwości wejścia do obiegu biogeochemicznego zależą od charakteru i trwałości tych połączeń [Dąbkowska-Naskręt i Bartkowiak 2001]. Status pierwiastków śladowych w glebach można scharakteryzować za pomocą analizy specjacyjnej. Zastosowanie analizy sekwencyjnej do oznaczenia zawartości poszczególnych frakcji selenu jest metodą pozwalającą na określenie jego mobilności w środowisku glebowym oraz przyswajalności przez rośliny [Abrams i Bureau 1989, Chao i Sanzolone 1989, Sharmasarkar i Vance 1994, Sèby i in. 1997, Bujdoš i in. 2000, 2005, Pyrżyńska 2002, Wang i Chen 2003, Hagarova i in. 2005, Piatak i in. 2006].

Procesy biologiczne, które kształtują żyzność gleb w ekosystemach lądowych, opierają się przede wszystkim na transformacji materii organicznej [Kobus 1995, Kalembasa 2003, Huang i in. 2005, Gonet 2007]. Związane są z działalnością drobnoustrojów i wydzielanymi przez nie enzymami oraz z tempem zachodzących przemian biogeochemicznych w obiegu pierwiastków [Ross 1971, Ladd 1978, Dowdle i Oremland 1998, Kieliszewska-Rokicka 2001, Nowak i in. 2002]. Aktywność enzymatyczna uważana jest za jeden z najbardziej czułych i miarodajnych wskaźników zmian zachodzących w glebie, jest także miarą jej produktywności i żyzności [Myśków i in. 1996, Koper i Piotrowska 2001, Caldwell 2005, Gil-Sotres 2005, Russel 2005]. Wielu autorów wskazuje na silny wpływ selenu na oksydoreduktazy: katalazę, peroksydazę glutationową i dysmutazę ponadtlenkową w organizmach zwierzęcych, natomiast nieliczne badania dotyczyły udziału selenu w procesach biochemicznych zachodzących w glebie i roślinach [Nowak i in. 2002, 2004].

Dehydrogenazy katalizują utlenianie związków organicznych przez odłączenie od cząsteczki organicznej dwóch atomów wodoru i przekazanie ich na koenzymy, które są pierwszymi akceptorami systemu transportu elektronów w procesie oddychania komórkowego [Piotrowska-Cyplik i in. 2007]. Uważa się, że całkowita aktywność dehydrogenaz jest wskaźnikiem systemu redoks oraz miarą aktywności oddechowej mikroorganizmów glebowych, a jej oznaczenie jest powszechnie wykorzystywane do oceny czynników niekorzystnie działających na drobnoustroje glebowe [Praveen-Kumar i Tarafdar 2003, Brzezińska i Włodarczyk 2005, Hawrot i in. 2005, Brzezińska 2006].

Reakcje oksydacji przeprowadzane przez peroksydazy wpływają w roślinach na polimeryzację substancji organicznych w celu formowania ligniny, biorą udział w katabolizmie auksyn i obronie przeciwko patogenom oraz w niektórych procesach oddychania [Baazis 1989, Kerstetter i in. 1998, Burton 2003, Regalado i in. 2004]. Stosunkowo mało wiadomo o rozmieszczeniu peroksydaz w glebie oraz ich roli w rozkładzie nadtlenu i polimeryzacji materii organicznej [Cooper i Zepp 1990, Davidson i in. 1995]. Niektórzy autorzy wskazują jednak na związek aktywności peroksydaz z zawartością kwasów fulwowych i huminowych [Serban i Nissenbaum 1986, Zepp i in. 1988, Davidson i in. 1995].

Katalaza – enzym, który jest obecny w komórkach wszystkich drobnoustrojów, wykorzystuje tlen do procesów oddechowych i chroni komórki przed toksycznym H_2O_2 , wytwarzanym w cytoplazmie i peroksydomach [Fiedurek i Szczodrak 1997, Trasar-Cepeda i in. 1999]. Naturalny substrat enzymu – nadtlenek wodoru – powstaje w trakcie metabolizmu oddechowego jako produkt uboczny działania pewnych oksydoreduktaz (dysmutazy ponadtlenkowej i niektórych oksydaz) i stanowi jedną z reaktywnych postaci tlenu – silnie utleniającą i łatwo reagującą z białkami, DNA i innymi składnikami komórek [Guwy i in. 1999, Brzezińska i Włodarczyk 2005, Mizuno i in. 2005, Brzezińska 2006]. W środowisku glebowym enzym ten, pomimo pewnego obniżenia aktywności, wykazuje znaczną stabilność dzięki sorpcji przez minerały ilaste i materię organiczną [Serban i Nissenbaum 1986, Furczak i in. 1991].

Drobnoustroje i wydzielane przez nie enzymy pośredniczą w procesach oksydoredukcyjnych zachodzących w glebie, które z kolei wpływają na rozpuszczalność i w konsekwencji mobilność oraz biodostępność selenu w systemie gleba – roślina [Roussel-Debet i in. 2005]. Wszystkie organizmy roślinne są zdolne do pobierania i metabolizowania selenu, jednak różnią się pod względem możliwości gromadzenia tego pierwiastka w tkankach [Szymańska i Hawrylak 2007]. Gatunki roślin z rodzaju *Astragalus*, *Stanleya*, *Morinda*, *Neptunia*, *Oonopsis* i *Xylorhiza* występujące na obszarach selenonośnych i gromadzące nawet do kilku tysięcy $mg\ Se\ kg^{-1}$ s.m. zaliczane są do hiperakumulatorów lub głównych akumulatorów selenu. Drugorzędne akumulatory selenu (*Aster*, *Atriplex*, *Grindelia*, *Melilotus*, *Brassica*), pomimo że rosną na glebach o niskiej lub średniej zawartości tego pierwiastka, kumulują do tysiąca $mg\ Se\ kg^{-1}$ s.m. [Broyer i in. 1972, Abuereish i Lahham 1987, Banuelos i Meek 1990, Feist i Parker 2001]. Większość roślin uprawnych nie wykazuje jednak zdolności do

gromadzenia selenu, z wyjątkiem gatunków bogatych w siarkę, np. z rodziny *Brassicaceae* i *Liliaceae* [Wachowicz 1993, Mayland 1994, Diaz-Alarcón i in. 1996, Badora 2000, Sors i in. 2005]. Kwestia niezbędności selenu dla rozwoju roślin wyższych, zwłaszcza nie akumulujących tego pierwiastka, nie została jak do tej pory w pełni wyjaśniona. Najnowsze badania wskazują, że małe ilości selenu mogą wywierać korzystny wpływ na rośliny poprzez działanie antyoksydacyjne, hamując peroksydację lipidów [Hartikainen i Xue 1999, Hartikainen i in. 2000, Pennanen i in. 2002, Seppänen i in. 2003, Turakainen i in. 2004, Cartes i in. 2005, Hartikainen 2005a, Szymańska i Hawrylak 2007, Kąklewski i in. 2008]. Selen w dużych ilościach działa natomiast jako prooksydant, potęgując gromadzenie szkodliwych dla roślin produktów peroksydacji. Korzystne działanie selenu na rośliny przejawia się również w zwiększaniu tolerancji roślin na stres oksydacyjny wywołany promieniowaniem UV, w opóźnianiu starzenia roślin, w bardziej efektywnym pobieraniu wody lub hamującym wpływie na intensywność transpiracji. Zawartość selenu w roślinach odzwierciedla na ogół jego zawartość w glebach, chociaż wpływ zróżnicowanych właściwości glebowych (pH, składu granulometrycznego, zawartości substancji organicznej i minerałów ilastych) oraz warunków atmosferycznych może zaciierać te prawidłowości [Gissel-Nielsen 1971, Kabata-Pendias i Pendias 1979, 1999, Johnsson 1991a,b, Kabata-Pendias 1994, Kabata-Pendias 1998, Borowska 2002, Antanaitis i in. 2008].

Naturalnie niska zawartość selenu w plonach roślin na niektórych obszarach przyczyniła się do podjęcia badań nad problemem zwiększenia zawartości tego pierwiastka w glebach, roślinach oraz w końcowych ogniwach łańcucha troficznego, czyli u ludzi i zwierząt [Whelan 1993, Stadlober 2001 i in., Adams i in. 2002, Arthur 2003, Broadley i in. 2006]. Chociaż zawartość selenu dostępnego dla roślin zależy głównie od typu gleby, dodatek specyficznych nawozów może w niektórych przypadkach znacząco wpływać na jego pobieranie przez rośliny. Taki wpływ może być wynikiem interakcji – w glebie i roślinie – między selenem a jonami dostarczonymi w nawozach [Varo 1993, Hesterberg 1998, Lavado i in. 1999]. W praktyce rolniczej, w wielu krajach do nawożenia selenem stosowano zarówno seleniany(IV), jak i seleniany(VI) [Varo 1993, Whelan 1993, Gissel-Nielsen 1998, Chen i in. 2002, Gupta i Gupta 2002, Aspila 2005] doglebowo i w formie oprysków [Poggi i in. 2000, Duscay i Lożek 2006], a także obornik, gnojowicę lub osady ściekowe [Logan i in. 1987, Cappon 1991, Blagojević i in. 1998, Borowska i Koper 2000, 2001, Stadlober i in. 2001, Øgaard i in. 2006, Sager 2007]. W Finlandii już od ponad dwudziestu lat wszelkie stosowane w rolnictwie nawozy są suplementowane selenianem(VI) sodu ze względu na bardzo niską zawartość selenu w żywności oraz w płynach ustrojowych ludzi [Ylärinta 1983, 1985, 1990, Varo i in. 1988, Aro i in. 1995, Venäläinen i in. 1997, Eurola i in. 2004]. Celem tych działań jest podwyższenie stężenia tego mikroelementu we krwi ludzi poprzez podniesienie jego zawartości w zbożach i produktach pochodzenia zwierzęcego do poziomu 0,05-0,2 mg·kg⁻¹.

Przez wiele lat Polskę zaliczano do grupy krajów o zadowalającej zawartości selenu w glebach, a wyniki badań epidemiologicznych nie potwierdzały występowania stanów niedoborowych we krwi ludzi. Jednak od kilkunastu lat pojawiają się doniesienia świadczące o obniżaniu się zawartości selenu w organizmach mieszkańców Polski [Zachara i Wąsowicz 1994, Kłapcińska i in. 1998, Wąsowicz i in. 2003, Poprzęcki i in. 2007]. Jedną z wielu przyczyn może być ograniczenie nawożenia obornikiem, które zwiększyło zakwaszenie gleb, a w konsekwencji spowodowało obniżenie pobierania tego mikroelementu przez rośliny oraz zmniejszenie zasobności gleb w selen. Firmy produkujące nawozy mikroelementowe mogą go dodawać, ale tylko na indywidualne zamówienie, jednak zainteresowanie wśród rolników jest niewielkie [Borkowski i Dyki 2007].

Z dotychczasowych badań, dotyczących istotnej roli selenu w żywieniu zwierząt i ludzi duże znaczenie mają te, które skupiają się na poznaniu jego glebowych zasobów oraz wskazaniu możliwości i konieczności ich powiększenia, zwłaszcza na obszarach o jego niskiej zawartości. W związku z tym, że tereny Polski zaliczyć można do obszarów o niskiej zasobności w ten pierwiastek, ewentualne podjęcie prób wzbogacenia gleb w selen ma szczególne znaczenie. Hipoteza badań własnych zakładała, że nawożenie organiczno-mineralne może istotnie wpłynąć na zmiany zawartości selenu ogółem i jego frakcji w glebie oraz w roślinach w trakcie ich rozwoju wegetacyjnego. Przyjęto, że zastosowanie nawozu naturalnego przyczyni się do wzrostu zawartości selenu w glebie i roślinach. Hipoteza zakładała również wpływ aktywności enzymów oksydoredukcyjnych na przemiany selenu w środowisku glebowym i w konsekwencji na jego dostępność dla roślin.

Celem badań własnych było określenie wpływu nawożenia zróżnicowanymi dawkami obornika i azotu na zawartość selenu ogółem w glebie, a także nagromadzenia selenu w częściach nadziemnych i korzeniach roślin w trakcie okresu wegetacyjnego. Dla oceny mobilności selenu w środowisku glebowym oraz jego przyswajalności przez rośliny oznaczono zawartość poszczególnych frakcji selenu za pomocą analizy sekwencyjnej. Badania własne miały także na celu określenie zmian aktywności wybranych enzymów niezbędnych w przemianach oksydoredukcyjnych w glebie. Poszukiwano ponadto związków między zawartością selenu w glebie i w roślinach a właściwościami fizykochemicznymi badanej gleby.

2. MATERIAŁ I METODY BADAŃ

2.1. Materiał glebowy i roślinny

Do badań wykorzystano próbki materiału glebowego i roślinnego pochodzącego z wieloletniego doświadczenia polowego prowadzonego przez Zakład Żywnienia Roślin i Nawożenia IUNG w Puławach na terenie RZD w Grabowie n. Wisłą w województwie mazowieckim. Zgodnie z „Systematyką gleb Polski” [1989] i „Klasyfikacją uziarnienia gleb i utworów mineralnych” [2008] gleba, na której przeprowadzono doświadczenie, należy do gleb płowych typowych i zaliczyć ją można do następujących jednostek hierarchicznych systematyki gleb: rząd – gleby brunatnoziemne, typ – gleby płowe, podtyp – gleby płowe typowe, rodzaj – wytworzone z gliny lekkiej, gatunek – glina piaszczysta (tab. 1).

Tabela 1. Skład granulometryczny badanej gleby pod zastosowanymi obiektami nawozowymi

Table 1. Particle size analysis of the soil researched under the fertilisation treatments applied

Obiekty nawozowe Fertilisation treatments*	Udział frakcji granulometrycznych Share of granulometric fractions (%)			Grupa uziarnienia według PTG Texture
	frakcja piaszkowa sand fraction	frakcja pyłowa silt fraction	frakcja ilowa clay fraction	
	(mm)			
	2-0,05	0,05-0,002	< 0,002	
0 – N0	71	20	9	gp**
0 – N1	78	12	10	gp
0 – N2	69	21	10	gp
0 – N3	69	22	9	gp
20 – N0	74	18	8	gp
20 – N1	79	11	10	gp
20 – N2	70	21	9	gp
20 – N3	68	22	10	gp
40 – N0	66	25	9	gp
40 – N1	69	21	10	gp
40 – N2	75	19	6	gp
40 – N3	68	24	8	gp
60 – N0	71	21	8	gp
60 – N1	70	23	7	gp
60 – N2	68	23	9	gp
60 – N3	70	22	8	gp
80 – N0	74	18	8	gp
80 – N1	69	21	10	gp
80 – N2	73	19	8	gp
80 – N3	71	21	8	gp

* 0, 20, 40, 60, 80 – dawka obornika – dose of manure (t·ha⁻¹)

N0, N1, N2, N3 – dawka N – N dose (kg·ha⁻¹)

** gp – glina piaszczysta – sandy loam

Zawartość części ziarnistych określono na następującym poziomie: frakcji piaskowej (2-0,05 mm) – 66-79%, frakcji pyłowej (0,05-0,002 mm) – 11-25% oraz frakcji iłowej (< 0,002 mm) – od 6 do 10% (tab. 1). Na podstawie procentowego udziału frakcji granulometrycznych stwierdzono, zgodnie z klasyfikacją PTG [2008], że badana gleba należała do gatunku gliny piaszczystej. Pod względem przydatności rolniczej glebę zaliczyć można do kompleksu żyniego bardzo dobrego (klasa bonitacyjna IVa).

Doświadczenie założono jako dwuczynnikowe, w układzie losowanych podbloków (split-plot) w czterech powtórzeniach z następującym doбором roślin w zmianowaniu: ziemniak – pszenica ozima – jęczmień jary – kukurydza. Czynniki doświadczenia:

- 1) A – nawożenie obornikiem pod ziemniaki w dawkach 20, 40, 60 i 80 t·ha⁻¹ świeżej masy + obiekt kontrolny (0),
- 2) B – nawożenie azotem w formie saletry amonowej w dawkach N1 – 45, N2 – 90 i N3 – 135 kg N·ha⁻¹ pod ziemniaki i kukurydzę oraz N1 – 40, N2 – 80 i N3 – 120 kg N·ha⁻¹ pod pszenicę ozimą i jęczmień jary + obiekt kontrolny (N0 – 0).

Zastosowano obornik pochodzenia bydłowego, którego skład chemiczny przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Skład chemiczny obornika

Table 2. Chemical composition of farmyard manure

Wyszczególnienie Description	N _t	P	K	s.m. – d.m.	Se
	(%)				(mg·kg ⁻¹ s.m. – d.m.)
Obornik bydłowy Cattle farmyard manure	0,46	0,17	0,56	24,7	2,28

Fosfor i potas pod ziemniaki, jęczmień jary i kukurydzę stosowano w formie superfosfatu potrójnego i soli potasowej, natomiast pod pszenicę ozimą w postaci agrofoski. Pod ziemniaki i pszenicę ozimą nawozy te stosowano jesienią, a pod jęczmień jary i kukurydzę wiosną.

Elementy agrotechniki roślin były zgodne z wymaganiami gatunków, a podstawowe z nich przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wybrane elementy agrotechniki roślin uprawianych w zmianowaniu
 Table 3. Some agrotechnical elements of plants under crop rotation

Rok Year	Roślina Plant	Odmiana Cultivar	Termin siewu Sowing date	Termin zbioru Harvest date	Nawożenie mineralne Mineral fertilisation (kg·ha ⁻¹)	
					P ₂ O ₅	K ₂ O
2001	Ziemniak Potato	Alicja	18.04.01	23.09.01	57	120
2002	Pszenica ozima Winter wheat	Korweta	02.10.01	29.07.02	48	72
2003	Jęczmień jary Spring barley	Stratus	16.04.03	04.08.03	57	85
2004	Kukurydza Maize	Nimba	23.04.04	30.09.04	55	160

2.2. Warunki pogodowe

Temperaturę oraz ilość i rozkład opadów zestawiono na podstawie danych uzyskanych z RZD w Grabowie n. Wisłą (tab. 4). W czteroletnim okresie badawczym wystąpiły trzy lata o temperaturze wyższej oraz trzy lata o opadach wyższych niż średnia z wielolecia dla tego regionu, który charakteryzuje się szczególnie niskimi opadami w stosunku do średniej krajowej.

W pierwszym roku doświadczenia średnia temperatura powietrza była podobna do średniej z wielolecia, a w okresie wegetacji ziemniaka (od kwietnia do września) o 1°C niższa. Opady zaś były najwyższe z zanotowanych w czteroletniu, wyższe o 199,6 mm, a w okresie wegetacji aż o 220,5 mm w porównaniu ze średnią z wielolecia. Wiosna i lato charakteryzowały się zróżnicowanymi warunkami termiczno-wilgotnościowymi. Po bardzo mokrym kwietniu w maju odnotowano suszę, która na krótko zahamowała rozwój roślin. W lipcu ponownie wystąpiły intensywne opady deszczu (średnio w ciągu miesiąca 206,4 mm), co niekorzystnie wpłynęło na rośliny.

W 2002 roku średnia temperatura powietrza była o 1,2°C, a w okresie wegetacji pszenicy ozimej o 1,4°C wyższa w porównaniu ze średnią z wielolecia. Suma opadów w okresie wegetacji pszenicy ozimej była o 38,5 mm niższa od średniej z wielolecia. Kwiecień i maj okazały się miesiącami o bardzo niskiej ilości opadów, których niedobór wpłynął na zróżnicowanie rozwoju roślin. Od czerwca warunki pogodowe uległy znacznej poprawie, a częste i intensywne opady, przy temperaturach przekraczających normę z wielolecia, wpłynęły na przyspieszenie rozwoju i dojrzewania roślin.

Tabela 4. Średnia dobową temperaturę powietrza (°C) oraz miesięczne sumy opadów (mm) w RZD Grabów n. Wisłą
 Table 4. Daily mean air temperature (°C) and total monthly precipitation (mm) in RZD Grabów n. Wisła

Miesiąc Month	Temperatura powietrza Air temperature				Średnia z wielolecia Mean for multi-year period	Opady atmosferyczne Precipitation				Średnia z wielolecia Mean for multi-year period
	Rok – Year					Rok – Year				
	2001	2002	2003	2004		2001	2002	2003	2004	
I	-0,8	-1,1	-3,4	-5,4	-3,5	36,9	37,7	43,0	24,8	30,0
II	-1,3	3,3	-6,0	-0,5	-2,4	20,8	52,3	12,6	48,5	29,0
III	0,2	4,3	1,6	2,8	1,5	64,4	30,6	16,4	45,0	31,0
IV	8,1	8,4	7,0	8,2	7,9	107,5	25,5	39,0	67,0	40,0
V	14,0	17,0	15,9	12,0	13,6	13,9	22,1	47,6	41,3	58,0
VI	15,2	17,4	17,8	15,9	17,0	67,4	104,4	35,4	83,7	70,0
VII	20,3	21,0	20,5	18,0	18,6	206,4	84,9	35,4	112,1	85,0
VIII	19,1	19,8	19,2	18,6	17,5	97,1	105,0	41,2	58,7	74,0
IX	12,1	12,9	13,5	13,0	13,5	102,2	44,6	63,9	17,5	47,0
X	10,7	7,0	5,5	9,7	8,2	29,2	97,1	57,5	35,4	44,0
XI	1,9	4,5	4,7	3,3	2,8	25,2	34,1	19,3	64,2	39,0
XII	-5,4	-6,8	0,6	1,6	-1,4	12,6	8,3	38,7	16,6	37,0
Średnia – Mean	7,8	9,0	8,1	8,1	7,8	–	–	–	–	–
Razem – Total	–	–	–	–	–	783,6	646,6	450,0	614,8	584,0

Suma opadów w roku 2003 była o 134 mm niższa od średniej z wielolecia, a w okresie wegetacji jęczmienia jarego – o 128,5 mm, przy średnich rocznych temperaturach powietrza wyższych o 1°C. Pod koniec I dekady kwietnia, gdy gleba charakteryzowała się uregulowanymi stosunkami wodno-powietrznymi, spadł śnieg, który przyhamował rozwój roślin. W połowie maja sytuacja pogodowa uległa pogorszeniu – wysokie temperatury oraz znikome opady, również przez cały okres letni, spowodowały zahamowanie wzrostu roślin.

W czwartym roku doświadczenia średnia temperatura powietrza oraz suma opadów były zbliżone do średnich z wielolecia, podobnie jak temperatura i suma opadów w okresie wegetacji kukurydzy. Miesiące wiosenne i letnie charakteryzowały się w miarę korzystnym dla rozwoju roślin rozkładem opadów, jedynie w połowie maja zanotowano dość niskie temperatury z przygruntowymi przymrozkami. Czerwiec także był zimny, a panujące chłody spowolniły wzrost i rozwój roślin. Dopiero lipiec z wyższymi temperaturami i znacznymi opadami deszczu umożliwił roślinom dość intensywny wzrost i rozwój. Od połowy sierpnia bilans wodny gleby na skutek braku opadów ulegał stopniowemu pogarszaniu, powodując podsychanie roślin i przyspieszenie dojrzewania.

2.3. Analiza chemiczna materiału glebowego i roślinnego

Do badań wykorzystano próbki gleby pobrane w latach 2001-2004 trzykrotnie w ciągu okresu wegetacyjnego – w marcu, maju i lipcu (pod uprawą pszenicy ozimej i jęczmienia jarego) oraz w maju, lipcu i wrześniu (pod uprawą ziemniaka i kukurydzy). Próbki pobrano z warstwy ornej 0-20 cm, z każdego poletka (4 powtórzenia dla każdego wariantu nawożenia), wysuszono, a następnie przesiano przez sito o średnicy oczek 2 mm.

W próbkach zbiorczych materiału glebowego (utworzonych z czterech powtórzeń) oznaczono:

- skład granulometryczny metodą Bouyoucosa-Casagrandego w modyfikacji Prószyńskiego [Lityński i in. 1976] – w pierwszym roku zmianowania, średnio dla terminów,
- pH w H₂O i w 1 mol·dm⁻³ KCl – potencjometrycznie,
- zawartość węgla w związkach organicznych (C_{org}) – metodą Tiurina [Lityński i in. 1976],
- zawartość azotu ogółem (N_T) – metodą Kjeldahla [Lityński i in. 1976].

W próbkach gleby pobranych trzykrotnie w ciągu okresu wegetacyjnego oznaczono:

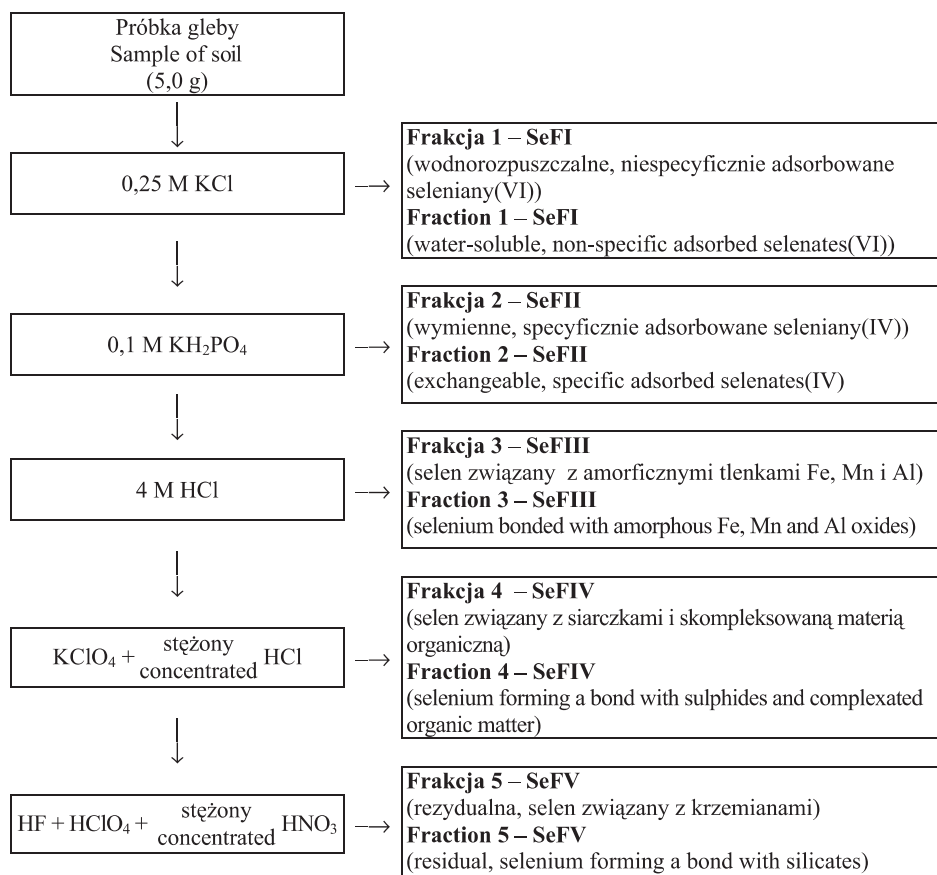
- zawartość selenu ogółem metodą Watkinsona [1966] – próbkę gleby zmineralizowano na mokro w mieszaninie stężonych kwasów HNO₃ i HClO₄ w zamkniętym układzie mikrofalowym firmy Millestone. W tych warunkach selen organiczny przechodził w postać nieorganiczną, utleniając się do selenianu(VI). Selenian(VI) zredukowano do selenianu(IV) za pomocą 0,1 M·dm⁻³ HCl. Selenian(IV) w reakcji z 2,3-diaminonaftalenem (DAN) tworzył kom-

pleksowy związek 4,5-benzopiazoselenol. Następnie do próbki dodano cykloheksan i wytrząsano. Po oddzieleniu faz zbierano warstwę cykloheksanową. Fluorescencję odczytywano przy użyciu spektrofotometru F-2000 firmy Hitachi, przy długości fali wzbudzenia 376 nm i fali emisji 520 nm. Oceny dokładności i powtarzalności metody dokonano przez oznaczenie tzw. błędu metody, który wyniósł 4,28% ($n = 10$), i próby odzysku, wynoszącej średnio 103,4%. Dokładność metody sprawdzono również przez wykonanie oznaczenia zawartości selenu ogółem w certyfikowanym materiale odniesienia CRM024-050 (glebie o uziarnieniu piasku gliniastego o $\text{pH} = 7,39$), przygotowanym przez Resource Technology Corporation (RTC). Oznaczona zawartość selenu ogółem w certyfikowanym materiale odniesienia wynosiła $0,558 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($n = 6$), natomiast podana w licencji – $0,540 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,

- aktywność dehydrogenaz (DHA) metodą Casida i in. [1964], polegającą na inkubacji gleby z bezbarwnym, rozpuszczalnym w wodzie substratem TTC (chlorek 2,3,5-trifenyloctrazolu), który redukowano enzymatycznie do barwnego, nierozpuszczalnego w wodzie trifenyloformazanu (TPF). TTC zastępuje naturalnie występujące akceptory, przejmując elektrony i protony odłączone przez dehydrogenazy od utlenianych związków organicznych. Wytworzony produkt reakcji enzymatycznej ekstrahowany był z gleby alkoholem etylowym i oznaczany kolorymetrycznie przy długości fali 485 nm przy użyciu spektrofotometru Marcel PRO. Wyniki podano w $\text{mg TPF}\cdot\text{g}^{-1} \text{ s.m.}\cdot 24\text{h}^{-1}$,
- aktywność peroksydaz (PX) metodą Zwiagincewa [1980], polegającą na inkubacji gleby z roztworem pirogalolu oraz nadtlenkiem wodoru. Ekstynkcję powstałej purpurogalliny zmierzono za pomocą spektrofotometru Marcel PRO przy długości fali 430 nm. Wyniki podano w $\text{mg purpurogalliny}\cdot\text{g}^{-1} \text{ s.m.}\cdot \text{h}^{-1}$,
- aktywność katalazy (CAT) metodą Johnsona i Templego [1964], polegającą na inkubacji gleby z dodanym nadtlenkiem wodoru. Pozostały w glebie H_2O_2 , nie rozłożony przez katalazę, odmiareczkowany nadmanganianem potasu w środowisku kwaśnym. Wyniki podano w $\text{mg H}_2\text{O}_2\cdot\text{g}^{-1} \text{ s.m.}\cdot \text{min}^{-1}$.

Oznaczenia zawartości selenu ogółem oraz aktywności enzymatycznej wykonano w 4 powtórzeniach.

Analizie specjacyjnej pięciu frakcji selenu (rys. 1) poddano próbki zbiorcze materiału glebowego, które utworzono łącząc próbki z czterech powtórzeń doświadczenia i trzech terminów, zgodnie z metodą Chao i Sanzolone [1989] w modyfikacji Wang i Chen [2003]. Metoda zaproponowana przez Chao i Sanzolone [1989] zakładała doprowadzenie końcowego roztworu każdej frakcji do stężenia 4-molowego przez dodanie stężonego HCl w celu otrzymania selenku wodoru (H_2Se). W badaniach własnych, zgodnie z modyfikacją Wang i Chen [2003], końcowy roztwór z każdej ekstrakcji zakwaszono do $\text{pH} = 1,7\text{-}2,0$ przez dodanie HCl. Obecne w roztworze seleniany(IV) chelatowano dodając 2,3-diaminonaftalen i oznaczano spektrofotometrycznie. Analizę sekwencyjną wykonano w 4 powtórzeniach, a wyniki przedstawiono w $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ oraz jako procentowy udział poszczególnych frakcji w puli selenu ogółem.



Rys. 1. Schemat procedury analizy sekwencyjnej wg Chao i Sanzolone [1989]

Fig. 1. Diagram of sequential extraction procedure according to Chao and Sanzolone [1989]

Schemat analizy sekwencyjnej zaproponowany przez Chao i Sanzolone [1989] dla frakcjonowania niemetalu i metaloidów tworzących aniony opiera się na założeniach Tessiera i in. [1979], opracowanych dla techniki sekwencyjnego frakcjonowania metali tworzących kationy. W celu wyjaśnienia geochemicznego występowania selenu w procedurze analizy sekwencyjnej frakcjonowania selenu zastosowano następujący schemat:

- 1) 0,25 M KCl przenosi do roztworu selen wodnorozpuszczalny. Niespecyficznie adsorbowany selen glebowy może być zastąpiony przez jon chlorkowy w wyniku wymiany anionowej. Selen rozpuszczalny, który występuje najczęściej w formie selenianów(VI), jest łatwo dostępny i przyswajalny przez rośliny;
- 2) 0,1 M KH₂PO₄ jest efektywnym ekstrahentem, który zastępuje seleniany(IV) zaadsorbowane na powierzchni tlenków metali i minerałów ilastych. Sele-

niany(IV), chociaż nie tak mobilne jak seleniany(VI), są również dostępne i przyswajalne przez rośliny;

- 3) 4 M HCl jest używany do wmywania z gleby składników związanych z amorficznymi tlenkami Fe, Mn i Al oraz węglanów. Jest także zdolny do hydrolizowania części glebowej materii organicznej. Selen ekstrahowany kwasem solnym może być potencjalnie dostępny poprzez uwalnianie na drodze chemicznej lub mikrobiologicznej. Obniżenie potencjału oksydoredukcyjnego i pH może spowodować, że tlenki Fe i Mn będą rozpuszczalne i w ten sposób uwolnić związany selen w formy rozpuszczalne lub przyswajalne;
- 4) połączenie stałego chloranu potasu i stężonego HCl tworzy silny utleniający związek, który jest bardzo efektywny w wmywaniu selenu występującego w minerałach siarczkowych i skompleksowanego z substancją organiczną. Selen tej frakcji jest jednak niedostępny dla roślin;
- 5) mieszanina kwasów, łącznie z kwasem fluorowodorowym, jest silnym chemicznym odczynnikiem, niszczącym strukturę krzemianu. Chociaż selen nie występuje w usieciowanym krzemianie, jego związki mogą być obecne w minerałach, które go otaczają. Selen występujący w końcowej frakcji analizy sekwencyjnej jest zupełnie niedostępny dla roślin i jego wpływ na środowisko jest nieznaczący [Chao i Sanzolone 1989].

Próbki roślinne pobierano z tych samych miejsc, z których pobierano glebę, dwukrotnie w sezonie wegetacyjnym, w następujących fazach fenologicznych:

Roślina	Fazy rozwojowe	
Ziemniak	pełnia kwitnienia: otwartych 50% kwiatów pierwszego kwiatostanu (BBCH 65) – lipiec	zamieranie liści i łodyg (BBCH 97) – wrzesień
Pszenica ozima	widocznych 5 rozkrzewień (BBCH 25) – marzec	dojrzałość woskowa twarda (BBCH 87) – lipiec
Jęczmień jary	początek wzrostu źdźbła (BBCH 30) – maj	dojrzałość woskowa twarda (BBCH 87) – lipiec
Kukurydza	faza piątego liścia (BBCH 15) – maj	pełna dojrzałość woskowa (BBCH 85) – wrzesień

Fazy fenologiczne roślin określono w skali BBCH na podstawie klucza do określania faz rozwojowych roślin jedno- i dwuliściennych [Klucz... 2005]. Z każdego obiektu pobierano po 10 roślin pszenicy ozimej i jęczmienia jarego oraz po 5 roślin ziemniaka i kukurydzy. Zebrane rośliny oczyszczono, podzielono na części nadziemne i korzenie lub bulwy, wysuszone i rozdrobniono w młynku laboratoryjnym. W próbkach zbiorczych materiału roślinnego utworzonych z czterech powtórzeń dla każdego obiektu nawozowego oznaczono zawartość selenu metodą fluorymetryczną Watkinsona [1966]. Wyniki jego zawartości w materiale roślinnym podano w $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m. Suchą masę roślin oznaczono metodą suszarkowo-wagową.

2.4. Analiza statystyczna

Obliczenia statystyczne wykonano metodą analizy wariancji za pomocą pakietu statystycznego Statistica 8.0 for Windows Stat.Soft. Inc. (2007). Istotność różnic między obiektami weryfikowano testem Tukeya na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. W celu znalezienia związków pomiędzy badanymi cechami przeprowadzono analizę korelacji liniowej.

3. WYNIKI BADAŃ

3.1. Podstawowa charakterystyka gleby

Badana gleba, pobrana z obiektów nie nawożonych obornikiem, charakteryzowała się wartościami kwasowości czynnej w zakresie od 6,0 do 6,8, natomiast wartości kwasowości wymiennej kształtowały się w granicach od 5,5 do 5,8 (tab. 5). Nieznacznie wyższe wartości pH oznaczono na ogół w próbkach glebowych z obiektów, na których obornik zastosowano w najwyższej dawce. Nie zauważono jednak wyraźnego zróżnicowania wartości odczynu w zależności od dawki obornika.

Tabela 5. Odczyn pH badanej gleby
Table 5. pH values of the soil investigated

Dawka obornika Dose of manure (t·ha ⁻¹)	Dawka N Dose of N (kg·ha ⁻¹)	Gleba pod uprawą – Soil under							
		ziemniaka potato		pszenicy ozimej winter wheat		jęczmienia jarego spring barley		kukurydzy maize	
		pH w – in							
		H ₂ O	KCl	H ₂ O	KCl	H ₂ O	KCl	H ₂ O	KCl
0	N0	6,0	5,8	6,8	5,7	6,1	5,5	6,3	5,8
	N1	6,0	5,8	6,8	5,8	6,0	5,6	6,2	5,8
	N2	6,1	5,6	6,8	5,8	6,2	5,6	6,2	5,8
	N3	6,0	5,6	6,7	5,7	6,1	5,5	6,1	5,8
20	N0	6,1	5,6	6,8	5,8	6,2	5,6	6,3	5,8
	N1	6,1	5,6	6,5	5,7	6,2	5,5	6,3	5,8
	N2	6,1	5,6	6,5	5,6	6,1	5,5	6,1	5,8
	N3	6,0	5,5	6,5	5,4	6,0	5,3	5,9	5,6
40	N0	6,1	5,6	6,3	5,6	6,2	5,5	6,0	5,7
	N1	6,2	5,6	6,6	5,5	6,2	5,6	6,2	5,7
	N2	6,1	5,5	6,6	5,6	6,2	5,5	6,0	5,7
	N3	6,1	5,4	6,6	5,5	6,1	5,6	5,9	5,6
60	N0	6,1	5,6	6,7	6,0	6,1	5,5	6,1	5,8
	N1	6,0	5,7	6,4	5,8	6,2	5,5	6,2	5,8
	N2	6,0	5,6	6,7	5,8	6,1	5,5	6,2	5,8
	N3	6,1	5,5	6,7	5,9	6,1	5,6	6,1	5,8
80	N0	6,2	5,6	6,9	5,9	6,3	5,7	6,2	5,8
	N1	6,2	5,6	6,9	5,7	6,2	5,7	6,2	5,9
	N2	6,1	5,5	6,7	5,9	6,2	5,6	6,1	5,9
	N3	6,0	5,6	6,8	5,9	6,1	5,6	6,2	5,7

Średnio najwyższą zawartość węgla w związkach organicznych w glebie, niezależnie od stosowanego nawożenia azotem, stwierdzono po zastosowaniu 60 i 80 t·ha⁻¹ obornika (tab. 6).

Tabela 6. Zawartość węgla związków organicznych, azotu ogółem i wartość stosunku C/N w glebie (średnio w okresie badawczym)

Table 6. Organic carbon, total nitrogen content and C/N ratio in soil (mean for the period investigated)

Dawka obornika (czynnik A) Dose of manure (factor A) (t·ha ⁻¹)	Dawka N (czynnik B) Dose of N (factor B) (kg·ha ⁻¹)	C _{org} (g·kg ⁻¹)	N _t (g·kg ⁻¹)	C/N
0	N0	6,67	0,638	10,6
	N1	6,71	0,625	10,8
	N2	6,51	0,628	10,4
	N3	7,34	0,663	11,1
Średnia – Mean		6,81	0,639	10,7
20	N0	6,43	0,659	9,8
	N1	6,95	0,692	10,0
	N2	6,99	0,724	9,7
	N3	7,33	0,723	10,2
Średnia – Mean		6,93	0,700	9,9
40	N0	7,57	0,771	9,8
	N1	7,63	0,751	10,3
	N2	7,77	0,801	9,8
	N3	8,50	0,857	9,9
Średnia – Mean		7,87	0,795	10,0
60	N0	7,89	0,827	9,6
	N1	8,17	0,834	9,5
	N2	8,32	0,816	10,3
	N3	8,61	0,865	10,1
Średnia – Mean		8,25	0,836	9,9
80	N0	8,48	0,861	10,0
	N1	8,60	0,852	10,0
	N2	8,59	0,830	10,4
	N3	9,18	0,935	9,9
Średnia – Mean		8,71	0,870	10,1
Średnia dla dawki N Mean for N dose	N0	7,41	0,751	10,0
	N1	7,61	0,751	10,1
	N2	7,64	0,760	10,1
	N3	8,19	0,809	10,2
Średnia – Mean		7,71	0,768	10,1
NIR – LSD	A	1,278	0,106	ni-ns
	B	0,576	0,052	ni-ns
	B/A	ni-ns	ni-ns	ni-ns
	A/B	ni-ns	ni-ns	ni-ns

ni-ns – różnica nieistotna – non-significant difference

Nawożenie azotem również przyczyniło się do zwiększenia zawartości węgla w związkach organicznych w glebie, a istotny wzrost stwierdzono na obiektach, na których składnik ten stosowano w największej dawce.

Zawartość azotu ogółem w badanej glebie zależała zarówno od nawożenia obornikiem, jak i azotem i wzrastała wraz ze zwiększaniem dawek obu nawozów (tab. 6). Najwyższą zawartość tego składnika stwierdzono na obiektach, na których stosowano 60 i 80 t·ha⁻¹ obornika. Wykazano również, że stosowanie niższych dawek obornika (20 i 40 t·ha⁻¹) nie wpłynęło istotnie na wzrost zawartości N ogółem. Zastosowanie najwyższej dawki azotu spowodowało taki sam przyrost zawartości tego składnika, jak w glebie z obiektu bez azotu i nawożonego najniższą dawką azotu.

Zmiany zawartości węgla i azotu w glebie pod wpływem nawożenia nie różnicowały istotnie wartości stosunku węgla do azotu. Obliczono, że wartość tego stosunku kształtowała się w zakresie 11-10 : 1, a zatem w glebie, z dużym prawdopodobieństwem, zachodziły procesy mineralizacji.

3.2. Zawartość selenu ogółem w glebie

Dane zamieszczone w tabeli 7 wskazują, że w okresie wegetacji ziemniaka średnia zawartość selenu w glebie kształtowała się w zakresie od 0,093 do 0,277 mg·kg⁻¹ i zwiększała wraz ze wzrostem dawki obornika. W każdym z badanych terminów wpływ obornika na zawartość selenu ogółem był podobny, gdyż wzrost dawek tego nawozu spowodował istotne zwiększenie jego zawartości w glebie. W maju stwierdzono największy – 3,4-krotny wzrost zawartości selenu ogółem w glebie na obiektach, na których zastosowano największą dawkę obornika. Podobny przyrost zawartości tego pierwiastka w glebie, prawie 3-krotny, wykazano w lipcu i we wrześniu. W maju i we wrześniu nie wykazano istotnego wpływu nawożenia azotem na kształtowanie się zawartości selenu ogółem w glebie, gdyż na wszystkich obiektach była ona podobna (tab. 7). Istotną statystycznie zależność stwierdzono jedynie w lipcu, chociaż nie wykazano jednoznacznego ukierunkowania wpływu azotu na zawartość selenu ogółem w glebie.

Zawartości średnie selenu ogółem w czasie wegetacji pszenicy ozimej mieściły się w granicach od 0,101 do 0,213 mg·kg⁻¹ i wzrastały wraz ze zwiększaniem dawek obornika (tab. 8). W podobny sposób kształtowała się zawartość tego pierwiastka pod wpływem nawożenia obornikiem w każdym terminie pobierania próbek glebowych. Analiza statystyczna wykazała istotny wpływ tego nawozu na koncentrację selenu ogółem w glebie, która wzrastała wraz z jego dawką. Średnio ponad 2-krotnie wyższą zawartość tego mikroelementu w glebie (w stosunku do obiektów nie nawożonych) stwierdzono na obiektach nawożonych 80 t·ha⁻¹ obornika.

Nawożenie azotem istotnie wpływało na zawartość selenu ogółem w glebie pobranej w maju i lipcu, natomiast w marcu takiego wpływu nie wykazano. W lipcu wzrastające dawki azotu obniżyły zawartość Se w glebie, natomiast w maju nie wykazano ukierunkowanego działania azotu w tym zakresie.

Tabela 7. Zawartość selenu ogółem w glebie pod uprawą ziemniaka ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
 Table 7. Total selenium content in soil under potato ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Dawka obornika (czynnik A) Dose of manure (factor A) ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Dawka N (czynnik B) Dose of N (factor B) ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Termin pobierania próbek Date of sampling			Średnia Mean
		maj May	lipiec July	wrzesień September	
0	0	0,083	0,091	0,108	0,094
	45	0,088	0,101	0,096	0,095
	90	0,088	0,092	0,096	0,092
	135	0,079	0,093	0,097	0,090
Średnia – Mean		0,085	0,094	0,099	0,093
20	0	0,146	0,141	0,126	0,138
	45	0,134	0,147	0,122	0,134
	90	0,142	0,148	0,124	0,138
	135	0,136	0,156	0,120	0,137
Średnia – Mean		0,140	0,148	0,123	0,137
40	0	0,174	0,182	0,174	0,177
	45	0,177	0,190	0,173	0,180
	90	0,172	0,177	0,171	0,173
	135	0,177	0,200	0,178	0,185
Średnia – Mean		0,175	0,187	0,174	0,179
60	0	0,228	0,210	0,205	0,214
	45	0,216	0,215	0,221	0,217
	90	0,223	0,191	0,190	0,201
	135	0,220	0,210	0,201	0,210
Średnia – Mean		0,222	0,207	0,204	0,211
80	0	0,295	0,263	0,270	0,276
	45	0,299	0,272	0,274	0,282
	90	0,271	0,277	0,277	0,275
	135	0,290	0,263	0,268	0,274
Średnia – Mean		0,289	0,269	0,272	0,277
Średnia dla dawki N Mean for N dose	0	0,185	0,177	0,177	0,180
	45	0,183	0,185	0,177	0,182
	90	0,179	0,177	0,172	0,176
	135	0,180	0,184	0,173	0,179
Średnia – Mean		0,182	0,181	0,175	0,179
NIR – LSD	A	0,011	0,007	0,005	
	B	ni-ns	0,004	ni-ns	
	B/A	0,018	0,016	0,015	
	A/B	0,019	0,017	0,016	

ni-ns – różnica nieistotna – non-significant difference

Tabela 8. Zawartość selenu ogółem w glebie pod uprawą pszenicy ozimej ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
 Table 8. Total selenium content in soil under winter wheat ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Dawka obornika (czynnik A) Dose of manure (factor A) ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Dawka N (czynnik B) Dose of N (factor B) ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Termin pobierania próbek Date of sampling			Średnia Mean
		marzec March	maj May	lipiec July	
0	0	0,098	0,098	0,100	0,099
	40	0,110	0,092	0,101	0,101
	80	0,104	0,108	0,104	0,105
	120	0,104	0,096	0,095	0,098
Średnia – Mean		0,104	0,099	0,100	0,101
20	0	0,135	0,172	0,176	0,161
	40	0,130	0,170	0,161	0,154
	80	0,135	0,175	0,154	0,155
	120	0,135	0,164	0,161	0,153
Średnia – Mean		0,134	0,170	0,163	0,156
40	0	0,166	0,192	0,144	0,167
	40	0,172	0,143	0,174	0,163
	80	0,175	0,205	0,177	0,186
	120	0,188	0,196	0,167	0,184
Średnia – Mean		0,175	0,184	0,166	0,175
60	0	0,191	0,183	0,192	0,189
	40	0,194	0,193	0,159	0,182
	80	0,191	0,197	0,196	0,195
	120	0,199	0,184	0,202	0,195
Średnia – Mean		0,194	0,189	0,187	0,190
80	0	0,246	0,199	0,236	0,227
	40	0,244	0,190	0,191	0,208
	80	0,229	0,200	0,206	0,212
	120	0,229	0,190	0,189	0,203
Średnia – Mean		0,237	0,195	0,206	0,213
Średnia dla dawki N Mean for N dose	0	0,167	0,169	0,170	0,169
	40	0,170	0,158	0,157	0,162
	80	0,167	0,177	0,167	0,170
	120	0,171	0,166	0,163	0,167
Średnia – Mean		0,169	0,167	0,164	0,167
NIR – LSD	A	0,009	0,012	0,012	
	B	ni-ns	0,006	0,009	
	B/A	0,017	0,019	0,014	
	A/B	0,018	0,020	0,014	

ni-ns – różnica nieistotna – non-significant difference

Zawartość selenu ogółem w glebie w okresie wegetacyjnym jęczmienia jarego zależała od nawożenia obornikiem (tab. 9).

Tabela 9. Zawartość selenu ogółem w glebie pod uprawą jęczmienia jarego ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
 Table 9. Total selenium content in soil under spring barley ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Dawka obornika (czynnik A) Dose of manure (factor A) ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Dawka N (czynnik B) Dose of N (factor B) ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Termin pobierania próbek Date of sampling			Średnia Mean
		marzec March	maj May	lipiec July	
0	0	0,096	0,074	0,079	0,083
	40	0,097	0,081	0,076	0,085
	80	0,098	0,078	0,072	0,083
	120	0,104	0,086	0,081	0,090
Średnia – Mean		0,099	0,080	0,077	0,085
20	0	0,152	0,090	0,087	0,110
	40	0,165	0,085	0,084	0,111
	80	0,154	0,115	0,079	0,116
	120	0,153	0,096	0,090	0,113
Średnia – Mean		0,156	0,097	0,085	0,113
40	0	0,176	0,109	0,095	0,127
	40	0,180	0,090	0,077	0,116
	80	0,172	0,115	0,134	0,140
	120	0,160	0,139	0,137	0,145
Średnia – Mean		0,175	0,113	0,111	0,132
60	0	0,192	0,139	0,109	0,147
	40	0,191	0,134	0,145	0,157
	80	0,196	0,133	0,119	0,149
	120	0,192	0,132	0,124	0,149
Średnia – Mean		0,193	0,135	0,124	0,151
80	0	0,209	0,142	0,134	0,162
	40	0,206	0,136	0,122	0,155
	80	0,205	0,157	0,122	0,161
	120	0,197	0,176	0,140	0,171
Średnia – Mean		0,204	0,153	0,130	0,162
Średnia dla dawki N Mean for N dose	0	0,165	0,111	0,101	0,126
	40	0,168	0,105	0,095	0,123
	80	0,165	0,119	0,105	0,130
	120	0,163	0,129	0,114	0,135
Średnia – Mean		0,165	0,116	0,105	0,129
NIR – LSD	A	0,007	0,013	0,006	
	B	ni-ns	0,014	0,008	
	B/A	ni-ns	0,023	0,016	
	A/B	ni-ns	0,025	0,017	

ni-ns – różnica nieistotna – non-significant difference

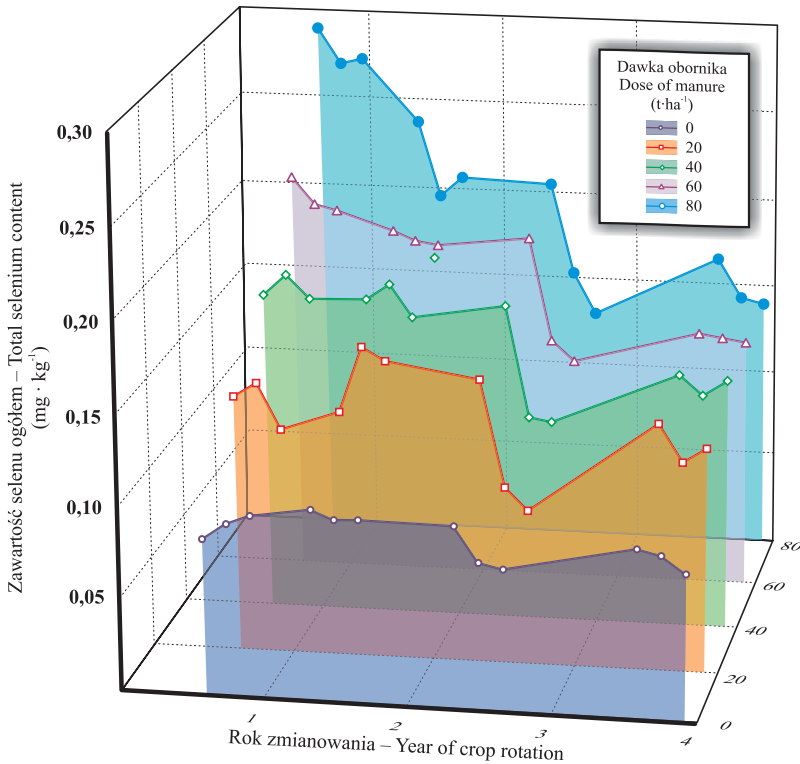
Każda z dawek obornika zwiększała w istotny sposób zawartość tego pierwiastka, przy czym najkorzystniejszą była dawka $80 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, gdyż po jej zastosowaniu zawartość selenu ogółem w glebie, w trakcie okresu wegetacyjnego, zwiększyła się od 68 do 106%. Aplikacja $120 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ azotu spowodowała wzrost zawartości selenu ogółem w glebie pobranej w maju i lipcu, odpowiednio o 16 i 13%, w porównaniu z obiektami, na których tego składnika nie stosowano. Analiza statystyczna wykazała, że wzrost ten był istotny.

Wyniki przedstawione w tabeli 10 wskazują, że średnia zawartość selenu ogółem podczas wegetacji kukurydzy kształtowała się na poziomie od 0,087 do $0,149 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ i zwiększała się wraz ze wzrostem dawek obornika. Tendencję taką wykazano we wszystkich terminach pobierania próbek glebowych. Wzrost ten został udowodniony statystycznie. Największą zawartość Se, średnio 1,7 razy więcej, stwierdzono na obiektach, na których stosowano największą dawkę obornika. Nawożenie azotem w istotny sposób wpływało na zawartość selenu w glebie, na której uprawiano kukurydzę. W maju nie wykazano jednak ukiepunkowanego wpływu tego składnika na zawartość Se. W lipcu zawartość selenu ogółem w glebie wzrastała jedynie do dawki $90 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$, natomiast we wrześniu stwierdzono istotny wzrost zawartości selenu ogółem w glebie na obiekcie, na którym zastosowano największą dawkę azotu.

Zawartość selenu ogółem w środowisku glebowym podlegała stałym wahaniom i wykazywała zmienność sezonową (rys. 2). W glebie nie nawożonej obornikiem, która stanowiła w warunkach doświadczenia materiał kontrolny, sezonowe zmiany zawartości selenu ogółem były jednak niewielkie. Zaobserwowano obniżenie zawartości tego pierwiastka w trakcie zmianowania, w pełni sezonu wegetacyjnego. Jesienią stwierdzono natomiast niewielki wzrost jego zawartości. Konsekwencją nawożenia obornikiem było istotne zwiększenie zawartości selenu ogółem w glebie wraz ze wzrostem dawki obornika w całym okresie badawczym. W pierwszym i drugim roku po aplikacji 20 i $40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ obornika zawartość selenu ogółem w glebie w pełni wegetacji roślin wzrosła, a przy końcu sezonu wegetacyjnego zmalała. W trzecim i czwartym roku stosowania obornika, w trakcie uprawy jęczmienia jarego i kukurydzy, najwyższą zawartość selenu wykazano wiosną, a następnie jego zawartość w czasie wegetacji roślin ulegała obniżeniu.

Tabela 10. Zawartość selenu ogółem w glebie pod uprawą kukurydzy ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
 Table 10. Total selenium content in soil under maize ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Dawka obornika (czynnik A) Dose of manure (factor A) ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Dawka N (czynnik B) Dose of N (factor B) ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Termin pobierania próbek Date of sampling			Średnia Mean
		maj May	lipiec July	wrzesień September	
0	0	0,092	0,088	0,077	0,086
	45	0,093	0,092	0,085	0,090
	90	0,093	0,088	0,081	0,087
	135	0,091	0,089	0,077	0,086
Średnia – Mean		0,092	0,089	0,080	0,087
20	0	0,130	0,113	0,132	0,125
	45	0,146	0,112	0,120	0,126
	90	0,137	0,116	0,120	0,124
	135	0,133	0,121	0,122	0,125
Średnia – Mean		0,136	0,116	0,124	0,125
40	0	0,133	0,117	0,138	0,129
	45	0,140	0,117	0,130	0,129
	90	0,155	0,148	0,129	0,144
	135	0,136	0,137	0,159	0,144
Średnia – Mean		0,141	0,130	0,139	0,137
60	0	0,149	0,138	0,129	0,139
	45	0,148	0,148	0,121	0,139
	90	0,157	0,131	0,156	0,148
	135	0,120	0,149	0,150	0,140
Średnia – Mean		0,143	0,141	0,139	0,142
80	0	0,211	0,132	0,131	0,158
	45	0,148	0,159	0,144	0,150
	90	0,177	0,163	0,146	0,162
	135	0,123	0,118	0,140	0,127
Średnia – Mean		0,165	0,143	0,140	0,149
Średnia dla dawki N Mean for N dose	0	0,143	0,118	0,121	0,127
	45	0,135	0,126	0,120	0,127
	90	0,144	0,129	0,126	0,133
	135	0,121	0,123	0,130	0,125
Średnia – Mean		0,135	0,124	0,124	0,128
NIR – LSD	A	0,010	0,019	0,011	
	B	0,007	0,008	0,008	
	B/A	0,016	0,020	0,015	
	A/B	0,017	0,022	0,016	



Rys. 2. Dynamika zawartości selenu ogółem w glebie w zależności od dawek obornika (średnio dla dawek azotu) w zmianowaniu

Fig. 2. Dynamics of total selenium content in soil depending on manure doses (mean for nitrogen doses) in crop rotation

3.3. Zawartość poszczególnych frakcji selenu w glebie

Dane zamieszczone w tabeli 11 wskazują na to, że w trakcie uprawy ziemiaka zawartość każdej z badanych frakcji selenu w glebie istotnie zależała od nawożenia obornikiem i zwiększała się wraz ze wzrostem jego dawki. Największy wpływ w tym zakresie miało zastosowanie $80 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ obornika. Po aplikacji tej dawki zawartość selenianów(VI), selenianów(IV) i selenu związanego z tlenkami metali wzrosła ponad 2-krotnie, a selenu związanego z substancją organiczną i selenu frakcji rezydualnej ponad 3-krotnie w stosunku do ich ilości w glebie, na której tego nawozu nie stosowano. Nawożenie każdą z dawek azotu istotnie zwiększyło zawartość selenianów(VI), natomiast wpływ azotu na zawartość selenu związanego z tlenkami metali, chociaż istotny statystycznie, nie wykazywał jednoznacznego ukierunkowania. Nie stwierdzono wpływu nawożenia azotem na kształtowanie się zawartości selenianów(IV), selenu związanego z substancją organiczną oraz selenu frakcji rezydualnej.

Tabela 11. Zawartość poszczególnych frakcji selenu w glebie pod uprawą ziemniaka ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 11. Content of particular fractions of selenium in soil under potato ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Dawka obornika (czynnik A) Dose of manure (factor A) ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Dawka N (czynnik B) Dose of N (factor B) ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Frakcja – Fraction				
		SeFI	SeFII	SeFIII	SeFIV	SeFV
0	0	0,015	0,015	0,021	0,032	0,006
	45	0,020	0,020	0,026	0,028	0,006
	90	0,020	0,023	0,026	0,033	0,007
	135	0,017	0,022	0,025	0,029	0,007
Średnia – Mean		0,018	0,020	0,025	0,030	0,007
20	0	0,020	0,025	0,037	0,048	0,017
	45	0,024	0,024	0,035	0,046	0,016
	90	0,023	0,025	0,037	0,041	0,015
	135	0,029	0,024	0,034	0,040	0,016
Średnia – Mean		0,024	0,025	0,036	0,044	0,016
40	0	0,030	0,037	0,043	0,056	0,014
	45	0,031	0,036	0,044	0,054	0,014
	90	0,029	0,037	0,043	0,052	0,015
	135	0,028	0,035	0,041	0,058	0,017
Średnia – Mean		0,030	0,036	0,043	0,055	0,015
60	0	0,034	0,044	0,048	0,064	0,020
	45	0,035	0,039	0,043	0,067	0,021
	90	0,034	0,043	0,033	0,074	0,016
	135	0,034	0,041	0,044	0,068	0,019
Średnia – Mean		0,034	0,042	0,042	0,068	0,019
80	0	0,039	0,052	0,048	0,089	0,022
	45	0,039	0,055	0,050	0,096	0,025
	90	0,042	0,057	0,049	0,105	0,027
	135	0,044	0,052	0,059	0,098	0,024
Średnia – Mean		0,041	0,054	0,052	0,097	0,025
Średnia dla dawki N Mean for N dose	0	0,028	0,035	0,039	0,060	0,016
	45	0,030	0,035	0,040	0,058	0,016
	90	0,030	0,037	0,038	0,061	0,016
	135	0,030	0,035	0,041	0,059	0,017
Średnia – Mean		0,030	0,035	0,040	0,059	0,016
NIR – LSD	A	0,003	0,004	0,002	0,004	0,003
	B	0,002	ni-ns	0,002	ni-ns	ni-ns
	B/A	0,005	0,005	0,006	0,007	ni-ns
	A/B	0,005	0,005	0,007	0,007	ni-ns

ni-ns – różnica nieistotna – non-significant difference

W okresie wegetacyjnym pszenicy ozimej każda z zastosowanych dawek obornika istotnie zwiększyła zawartość badanych frakcji selenu w glebie (tab. 12) w odniesieniu do obiektów, na których tego nawozu nie stosowano. Wzrastające dawki obornika (do poziomu $60 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$) zwiększały zawartość selenianów(VI). Wzrost ten został udowodniony statystycznie. Dalsze zwiększenie dawki nawozu naturalnego istotnie obniżyło zawartość tej frakcji w glebie. Analiza statystyczna wykazała istotny wpływ nawożenia obornikiem na kształtowanie się zawartości selenianów(IV), wzrastającej wraz z jego dawką. Najwyższą zawartość tej frakcji selenu wykazano na obiektach, na których stosowano największą dawkę nawozu. Nawożenie obornikiem spowodowało również istotne zwiększenie zawartości frakcji związanej z tlenkami metali, a największy jej wzrost – o 50% – wykazano na obiektach, na których stosowano 20 i $80 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ obornika. Zawartość frakcji selenu skompleksowanego z substancją organiczną kształtowała się średnio na poziomie od 0,026 do $0,068 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Obornik istotnie wpływał na jej zawartość w glebie, największy wpływ w tym zakresie wykazano po zastosowaniu najwyższej jego dawki. Nawożenie obornikiem w podobny sposób wpływało na zawartość selenu frakcji rezydualnej. Największy jej przyrost – średnio o prawie 70% – stwierdzono na obiektach, na których stosowano 60 i $80 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ obornika. Nawożenie azotem oddziaływało w zróżnicowany sposób na zawartość poszczególnych frakcji selenu w badanej glebie (tab. 12). Zawartość selenianów(VI) i selenianów(IV) zwiększyła się istotnie na obiektach, na których składnik ten stosowano w dawkach 80 i $120 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Zawartość frakcji selenu zasocjowanego z tlenkami metali i selenu skompleksowanego z substancją organiczną zależała natomiast istotnie od nawożenia azotem, chociaż nie wykazano wyraźnego ukierunkowania w tym zakresie. Wpływ nawożenia tym składnikiem na zawartość frakcji rezydualnej okazał się nieistotny statystycznie.

Nawożenie obornikiem w zróżnicowany sposób wpływało na kształtowanie się zawartości poszczególnych frakcji selenu w glebie w czasie wegetacji jęczmienia jarego (tab. 13). Najwyższą zawartość selenianów(VI) wykazano na obiekcie kontrolnym. Zawartość tej frakcji selenu obniżała się na obiektach, na których zastosowano 20 i $40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ obornika. Dalsze zwiększanie dawek nawozu naturalnego istotnie wpłynęło na wzrost zawartości tej frakcji, chociaż przyjmowała ona wartości niższe niż na obiekcie kontrolnym. W przypadku selenianów(IV) stwierdzono istotny wpływ nawożenia obornikiem na ich zawartość w glebie, jednak nie wykazano jednoznacznego ukierunkowania wpływu tego nawozu. Wzrastające dawki obornika zwiększyły istotnie zawartość selenu zasocjowanego z tlenkami metali oraz selenu skompleksowanego z substancją organiczną. Najwyższą zawartość tych frakcji wykazano wówczas, gdy stosowano $80 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ obornika. Każda z dawek obornika wpłynęła istotnie na zawartość frakcji rezydualnej, a największy 2,5-krotny jej wzrost stwierdzono na obiektach, na których zastosowano największą dawkę tego nawozu.

Analiza statystyczna wykazała istotny wpływ nawożenia azotem na kształtowanie się zawartości selenianów(VI) i selenu frakcji rezydualnej.

Tabela 12. Zawartość poszczególnych frakcji selenu w glebie pod uprawą pszenicy ozi-
mej ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 12. Content of particular fractions of selenium in soil under winter wheat ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Dawka obornika (czynnik A) Dose of manure (factor A) ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Dawka N (czynnik B) Dose of N (factor B) ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Frakcja – Fraction				
		SeFI	SeFII	SeFIII	SeFIV	SeFV
0	0	0,031	0,028	0,025	0,027	0,009
	40	0,033	0,030	0,029	0,025	0,010
	80	0,018	0,022	0,024	0,026	0,012
	120	0,021	0,023	0,024	0,026	0,012
Średnia – Mean		0,026	0,026	0,026	0,026	0,011
20	0	0,024	0,032	0,037	0,052	0,017
	40	0,027	0,033	0,036	0,048	0,017
	80	0,035	0,041	0,039	0,042	0,017
	120	0,040	0,042	0,044	0,062	0,018
Średnia – Mean		0,032	0,037	0,039	0,051	0,017
40	0	0,033	0,036	0,039	0,050	0,015
	40	0,041	0,044	0,039	0,049	0,016
	80	0,041	0,044	0,037	0,030	0,014
	120	0,039	0,041	0,035	0,029	0,019
Średnia – Mean		0,039	0,041	0,038	0,040	0,016
60	0	0,042	0,045	0,035	0,057	0,020
	40	0,036	0,040	0,038	0,056	0,020
	80	0,048	0,049	0,033	0,039	0,018
	120	0,039	0,047	0,031	0,056	0,018
Średnia – Mean		0,041	0,045	0,034	0,052	0,019
80	0	0,029	0,048	0,041	0,065	0,015
	40	0,028	0,044	0,045	0,062	0,018
	80	0,037	0,050	0,033	0,065	0,019
	120	0,042	0,046	0,035	0,079	0,020
Średnia – Mean		0,034	0,047	0,039	0,068	0,018
Średnia dla dawki N Mean for N dose	0	0,032	0,038	0,035	0,050	0,015
	40	0,033	0,038	0,037	0,048	0,016
	80	0,036	0,041	0,033	0,040	0,016
	120	0,036	0,040	0,034	0,050	0,017
Średnia – Mean		0,034	0,039	0,035	0,047	0,016
NIR – LSD	A	0,002	0,002	0,004	0,010	0,001
	B	0,004	0,003	0,004	0,005	ni-ns
	B/A	0,008	0,006	0,008	0,014	0,003
	A/B	0,008	0,006	0,009	0,015	0,003

ni-ns – różnica nieistotna – non-significant difference

Tabela 13. Zawartość poszczególnych frakcji selenu w glebie pod uprawą jęczmienia jarego ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 13. Content of particular fractions of selenium in soil under spring barley ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Dawka obornika (czynnik A) Dose of manure (factor A) ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Dawka N (czynnik B) Dose of N (factor B) ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Frakcja – Fraction				
		SeFI	SeFII	SeFIII	SeFIV	SeFV
0	0	0,020	0,025	0,023	0,033	0,008
	40	0,021	0,028	0,024	0,035	0,010
	80	0,017	0,029	0,023	0,025	0,008
	120	0,018	0,023	0,023	0,027	0,009
Średnia – Mean		0,021	0,026	0,023	0,030	0,009
20	0	0,020	0,018	0,022	0,040	0,014
	40	0,019	0,015	0,021	0,038	0,014
	80	0,018	0,019	0,024	0,032	0,018
	120	0,013	0,017	0,024	0,033	0,020
Średnia – Mean		0,018	0,017	0,023	0,036	0,016
40	0	0,014	0,018	0,025	0,038	0,010
	40	0,020	0,020	0,023	0,050	0,010
	80	0,015	0,021	0,027	0,049	0,013
	120	0,016	0,018	0,031	0,067	0,014
Średnia – Mean		0,016	0,019	0,027	0,051	0,012
60	0	0,020	0,028	0,036	0,062	0,018
	40	0,020	0,030	0,036	0,054	0,019
	80	0,018	0,026	0,033	0,065	0,016
	120	0,015	0,020	0,036	0,055	0,015
Średnia – Mean		0,018	0,026	0,035	0,059	0,017
80	0	0,020	0,023	0,042	0,072	0,018
	40	0,019	0,024	0,031	0,052	0,024
	80	0,018	0,026	0,041	0,074	0,023
	120	0,021	0,025	0,032	0,048	0,024
Średnia – Mean		0,020	0,025	0,037	0,062	0,023
Średnia dla dawki N Mean for N dose	0	0,019	0,022	0,030	0,049	0,014
	40	0,020	0,023	0,027	0,046	0,015
	80	0,017	0,024	0,030	0,049	0,016
	120	0,017	0,021	0,029	0,046	0,016
Średnia – Mean		0,018	0,023	0,029	0,048	0,015
NIR – LSD	A	0,004	0,003	0,005	0,009	0,001
	B	0,001	ni-ns	ni-ns	ni-ns	0,001
	B/A	ni-ns	0,006	ni-ns	0,019	0,003
	A/B	ni-ns	0,006	ni-ns	0,020	0,003

ni-ns – różnica nieistotna – non-significant difference

Tabela 14. Zawartość poszczególnych frakcji selenu w glebie pod uprawą kukurydzy ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 14. Content of particular fractions of selenium in soil under maize ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Dawka obornika (czynnik A) Dose of manure (factor A) ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Dawka N (czynnik B) Dose of N (factor B) ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Frakcja – Fraction				
		SeFI	SeFII	SeFIII	SeFIV	SeFV
0	0	0,021	0,022	0,024	0,029	0,016
	45	0,017	0,024	0,023	0,031	0,018
	90	0,021	0,021	0,023	0,031	0,018
	135	0,021	0,023	0,021	0,029	0,016
Średnia – Mean		0,020	0,023	0,023	0,030	0,017
20	0	0,015	0,026	0,035	0,026	0,020
	45	0,015	0,019	0,033	0,043	0,019
	90	0,013	0,026	0,032	0,041	0,017
	135	0,016	0,023	0,033	0,045	0,019
Średnia – Mean		0,015	0,024	0,033	0,039	0,019
40	0	0,019	0,028	0,031	0,044	0,019
	45	0,021	0,025	0,033	0,042	0,016
	90	0,021	0,028	0,028	0,039	0,016
	135	0,017	0,027	0,029	0,041	0,018
Średnia – Mean		0,020	0,027	0,030	0,042	0,017
60	0	0,024	0,037	0,039	0,024	0,021
	45	0,027	0,035	0,037	0,021	0,018
	90	0,029	0,039	0,031	0,024	0,018
	135	0,026	0,034	0,033	0,026	0,019
Średnia – Mean		0,027	0,036	0,035	0,024	0,019
80	0	0,024	0,032	0,034	0,033	0,014
	45	0,031	0,031	0,031	0,053	0,014
	90	0,035	0,030	0,032	0,057	0,014
	135	0,031	0,032	0,030	0,043	0,014
Średnia – Mean		0,030	0,031	0,032	0,047	0,014
Średnia dla dawki N Mean for N dose	0	0,021	0,029	0,033	0,031	0,018
	45	0,022	0,027	0,031	0,038	0,017
	90	0,024	0,029	0,029	0,038	0,017
	135	0,022	0,028	0,029	0,037	0,017
Średnia – Mean		0,022	0,028	0,031	0,036	0,017
NIR – LSD	A	0,004	0,003	0,003	0,005	0,002
	B	0,002	0,002	0,003	ni-ns	0,001
	B/A	0,006	ni-ns	ni-ns	0,013	ni-ns
	A/B	0,006	ni-ns	ni-ns	0,014	ni-ns

ni-ns – różnica nieistotna – non-significant difference

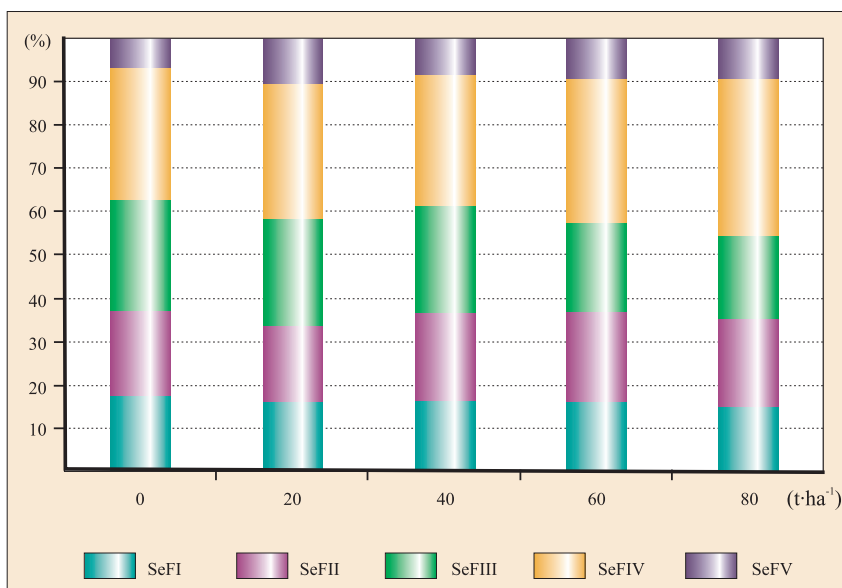
Zawartość selenianów(VI) w badanej glebie obniżyła się istotnie na obiektach, na których stosowano 80 i 120 kg N·ha⁻¹, natomiast w przypadku frakcji rezydualnej wykazano tendencję odwrotną. Jej zawartość systematycznie wzrastała wraz ze wzrostem dawki tego składnika.

Dane zamieszczone w tabeli 14 wskazują na to, że nawożenie obornikiem w zróżnicowany sposób wpływało na kształtowanie się zawartości wszystkich badanych frakcji selenu w glebie, na której uprawiano kukurydzę. Najniższą zawartość selenianów(VI) stwierdzono na obiekcie, na którym nawóz ten stosowano w dawce 20 t·ha⁻¹. Zawartość tej frakcji selenu systematycznie wzrastała wraz z ilością wprowadzanego do gleby obornika. Podobną tendencję zauważono w przypadku selenianów(IV), jednak ich zawartość wzrastała tylko do 60 t·ha⁻¹ obornika. Każda z dawek obornika wpływała istotnie na zawartość selenu związanego z tlenkami metali, selenu skompleksowanego z substancją organiczną oraz frakcji rezydualnej, chociaż nie wykazano wyraźnego ukierunkowania w tym zakresie. Nawożenie azotem w istotny sposób wpływało na ogół na zawartość badanych frakcji selenu w glebie, nie miało jednak wpływu na zawartość frakcji selenu skompleksowanego z substancją organiczną. Jedynie nawożenie 90 kg N·ha⁻¹ istotnie oddziaływało na kształtowanie się zawartości selenianów(VI), gdyż po zastosowaniu tej dawki zawartość frakcji zwiększyła się o 14%. W przypadku frakcji selenu zasocjowanego z tlenkami metali i frakcji rezydualnej nawożenie tym składnikiem istotnie zmniejszało ich zawartość w glebie.

3.4. Udział poszczególnych frakcji selenu w całkowitej zawartości tego pierwiastka

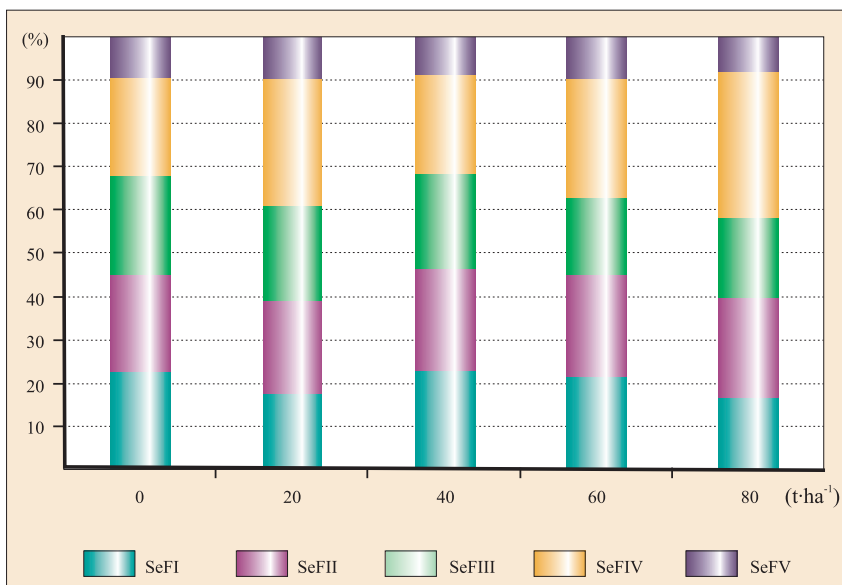
W okresie wegetacyjnym ziemniaka udział selenianów(VI) w całkowitej puli selenu w glebie wahał się od 15 do 18% (rys. 3). Najwyższą procentową zawartość tej frakcji stwierdzono na obiekcie, na którym obornika nie stosowano, a wraz ze zwiększeniem dawki nawozu wykazano obniżenie jej udziału. Udział procentowy selenianów(IV) w całkowitej ilości selenu kształtował się w przedziale od 18 do 20%, a najniższy określono na obiekcie, na którym obornik stosowano w dawce 20 t·ha⁻¹. Zatem selen najbardziej przyswajalny dla roślin, występujący w formie selenianów(VI) i selenianów(IV), stanowił od 35 do 38% całkowitej zawartości tego pierwiastka w glebie i obniżał się wraz ze wzrostem dawek obornika. Udział selenu związanego z tlenkami metali (SeFIII) wahał się od 19 do 26% ogólnej zawartości selenu w glebie. Stwierdzono obniżenie się udziału tej frakcji wraz ze zwiększaniem dawki nawozu. W glebie dominowała frakcja selenu skompleksowanego z substancją organiczną. Jej udział w zawartości selenu ogółem kształtował się w granicach od 30 do 36% i był najwyższy na obiekcie, na którym obornik stosowano w dawce 80 t·ha⁻¹. Selen frakcji rezydualnej stanowił od 7 do 11% ogółu selenu w glebie.

Udział selenianów(VI) w ogólnej ilości selenu w glebie pod uprawą pszenicy ozimej wahał się od 18 do 24% (rys. 4) i był najwyższy na obiekcie, na którym zastosowano obornik w dawce 40 t·ha⁻¹.



Rys. 3. Udział poszczególnych frakcji selenu (SeFI-SeFV) w zawartości selenu ogółem w glebie pod uprawą ziemniaka (średnio dla dawek azotu)

Fig. 3. Share of particular selenium fractions (SeFI-SeFV) in total selenium content in soil under potato (mean for nitrogen doses)



Rys. 4. Udział poszczególnych frakcji selenu (SeFI-SeFV) w zawartości selenu ogółem w glebie pod uprawą pszenicy ozimej (średnio dla dawek azotu)

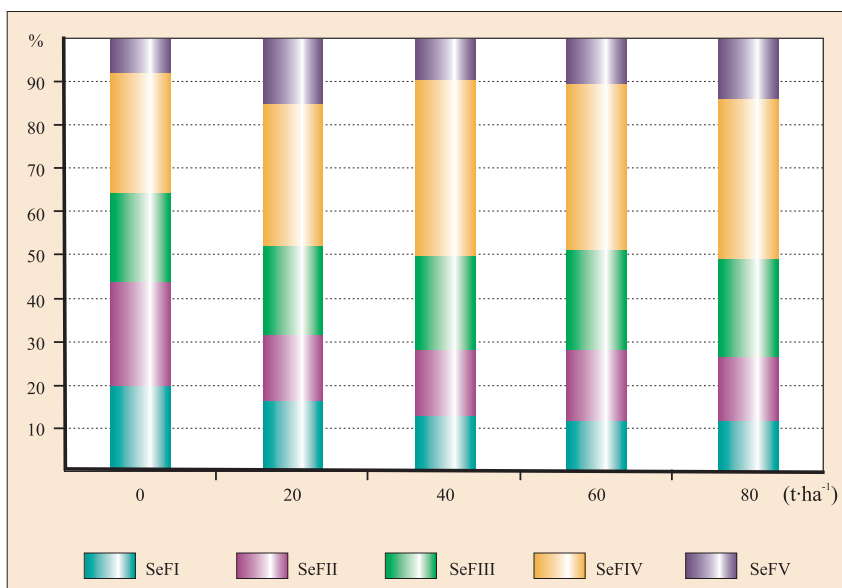
Fig. 4. Share of particular selenium fractions (SeFI-SeFV) in total selenium content in soil under winter wheat (mean for nitrogen doses)

Procentowy udział selenianów(IV) w całkowitej zawartości selenu kształtował się w przedziale od 21 do 25%, przy czym najniższy odnotowano w glebie z obiektu, na którym stosowano $20 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ obornika. Najwyższy udział tej frakcji w zawartości selenu ogółem, wynoszący 25%, określono w glebie z obiektu nawożonego $80 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ obornika. Procentowy udział frakcji selenu najlepiej przyswajalnych dla roślin (SeFI i SeFII) stanowił więc od 43 do 48% całkowitej ilości tego pierwiastka w glebie i był największy na obiekcie kontrolnym. W badanej glebie udział selenu związanego z tlenkami metali wahał się w przedziale od 18 do 24% selenu ogółem i zazwyczaj obniżał wraz ze wzrostem dawki obornika. Selen skompleksowany z substancją organiczną stanowił od 23 do 36% ogólnej zawartości tego pierwiastka. Wysoki procentowy udział tej frakcji selenu wykazano w glebie z obiektu, na którym stosowano największą dawkę obornika. Selen frakcji rezydualnej stanowił średnio 10% ogólnej zawartości selenu i występował na zbliżonym poziomie, niezależnie od zastosowanej dawki nawozu.

W glebie, na której uprawiano jęczmień jary udział selenianów(VI) w całkowitej puli selenu mieścił się w granicach od 11 do 20% (rys. 5). Najwyższy procentowy udział tej frakcji w zawartości selenu ogółem stwierdzono w glebie z obiektu kontrolnego, a wraz ze wzrostem dawki obornika jej udział w całkowitej zawartości selenu obniżał się. Gleba obiektu kontrolnego cechowała się również najwyższym udziałem selenianów(IV) w ogólnej puli selenu. Udział tej frakcji selenu w glebie z obiektów nawożonych obornikiem kształtował się na poziomie 14-16%. Wynika z tego, że udział najbardziej mobilnych selenianów(VI) i selenianów(IV) w glebie stanowił od 25 do 44% selenu ogółem i obniżał się wraz ze zwiększaniem dawki obornika. Udział frakcji związanej z tlenkami metali wahał się natomiast w dość wąskim zakresie od 20 do 22% zawartości selenu ogółem (rys. 5) i był niezależny od dawki obornika. Selen skompleksowany z glebową substancją organiczną stanowił 28-38% ogólnej zawartości selenu w badanej glebie. Najniższy udział tej frakcji określono w glebie nie nawożonej obornikiem. Udział selenu frakcji rezydualnej w całkowitej ilości selenu w badanej glebie mieścił się w granicach 8-15%.

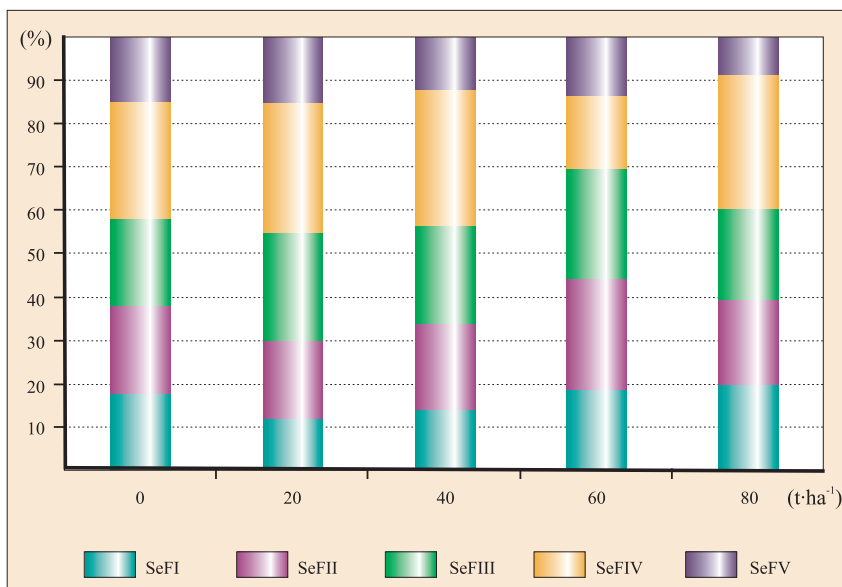
W okresie wegetacji kukurydzy udział selenianów(VI) w całkowitej puli selenu w glebie wahał się od 12 do 20% (rys. 6). Wzrastające dawki obornika wpłynęły na zwiększenie udziału tej frakcji. Procentowy udział selenianów(IV) w całkowitej ilości selenu w badanej glebie mieścił się w przedziale od 18 do 24%, przy czym najniższy określono w glebie z obiektu nawożonego obornikiem na poziomie $20 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Zatem selen najbardziej mobilny, występujący we frakcjach SeFI i SeFII, stanowił od 30 do 42% całkowitej zawartości selenu w glebie.

W glebie obiektu kontrolnego udział selenu przyswajalnego dla roślin stanowił około 38% zawartości selenu ogółem, a na obiektach, na których stosowano obornik, jego udział w ogólnej puli selenu kształtował się w zakresie 30-42%. Udział selenu związanego z tlenkami metali wahał się w granicach od 21 do 25% ogólnej zawartości selenu i był największy na obiekcie, na którym stosowano $20 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ obornika.



Rys. 5. Udział poszczególnych frakcji selenu (SeFI-SeFV) w zawartości selenu ogółem w glebie pod uprawą jęczmienia jarego (średnio dla dawek azotu)

Fig. 5. Share of particular selenium fractions (SeFI-SeFV) in total selenium content in soil under spring barley (mean for nitrogen doses)



Rys. 6. Udział poszczególnych frakcji selenu (SeFI-SeFV) w zawartości selenu ogółem w glebie pod uprawą kukurydzy (średnio dla dawek azotu)

Fig. 6. Share of particular selenium fractions (SeFI-SeFV) in total selenium content in soil under maize (mean for nitrogen doses)

W glebie dominowała frakcja selenu zasocjowana z substancją organiczną, a jej udział w całkowitej zawartości selenu mieścił się w granicach od 16 do 31%. Selen frakcji rezydualnej stanowił od 9 do 15% ogółu selenu w glebie i obniżał się wraz ze wzrostem dawki obornika.

3.5. Aktywność enzymatyczna gleby

3.5.1. Aktywność dehydrogenazowa

Dane przedstawione w tabeli 15 wskazują na to, że aktywność dehydrogenaz w okresie wegetacji ziemniaka kształtowała się średnio w zakresie od 0,050 do 0,101 mg TPF·g⁻¹ s.m.·24h⁻¹ i wzrastała wraz ze zwiększaniem dawki obornika. We wszystkich terminach pobierania próbek glebowych wykazano podobny wpływ tego nawozu na aktywność dehydrogenaz. W maju największą aktywność tych enzymów stwierdzono na obiektach, na których stosowano największą dawkę obornika. Na tych obiektach aktywność enzymatyczna wzrosła 2-krotnie w porównaniu z oznaczoną w glebie, na której obornika nie stosowano. Udowodniono również interakcję dawek obornika i azotu w kształtowaniu się aktywności dehydrogenazowej w trakcie wegetacji ziemniaka. Największy wpływ w tym zakresie wykazano po zastosowaniu 40 i 60 t·ha⁻¹ obornika, przy równoczesnym nawożeniu azotem na poziomie 135 kg·ha⁻¹. Na tych obiektach stwierdzono niższą o 8 do 84% aktywność dehydrogenaz w porównaniu z obiektami, na których tego składnika nie stosowano. W każdym z badanych terminów wykazano istotny wpływ azotu na aktywność dehydrogenazową gleby. W próbkach glebowych pobranych w maju i lipcu aktywność enzymatyczna obniżała się wraz ze wzrostem dawki tego składnika, natomiast we wrześniu zależność ta nie wykazywała jednoznacznego ukierunkowania.

Wartości średnie aktywności dehydrogenazowej w okresie wegetacyjnym pszenicy ozimej (tab. 16) wskazują, że nawożenie obornikiem do dawki 60 t·ha⁻¹ stymulowało aktywność enzymów. Dalsze zwiększenie ilości nawozu powodowało nieznaczne jej obniżenie. W glebie pobranej w marcu aktywność dehydrogenazowa na obiekcie kontrolnym oraz na obiektach, na których stosowano 20 i 40 t·ha⁻¹ obornika, utrzymywała się na zbliżonym poziomie. Dopiero zwiększenie dawki obornika do 60 i 80 t·ha⁻¹ spowodowało istotny wzrost ich aktywności, odpowiednio o 14 i 32%. W próbkach pobranych w maju i lipcu wzrastające dawki obornika natomiast zwiększały aktywność dehydrogenaz tylko do poziomu 60 t·ha⁻¹. Wzrost ten został udowodniony statystycznie. Zastosowanie największej dawki obornika nie zwiększyło aktywności dehydrogenazowej badanej gleby.

Tabela 15. Aktywność dehydrogenaz (DHA) w glebie pod uprawą ziemniaka
(mg TPF·g⁻¹ s.m.·24h⁻¹)

Table 15. Dehydrogenases activity (DHA) in soil under potato (mg TPF·g⁻¹ d.m.·24h⁻¹)

Dawka obornika (czynnik A) Dose of manure (factor A) (t·ha ⁻¹)	Dawka N (czynnik B) Dose of N (factor B) (kg·ha ⁻¹)	Termin pobierania próbek Date of sampling			Średnia Mean
		maj May	lipiec July	wrzesień September	
0	0	0,040	0,052	0,056	0,049
	45	0,051	0,041	0,063	0,052
	90	0,033	0,047	0,060	0,047
	135	0,047	0,049	0,054	0,050
Średnia – Mean		0,043	0,047	0,058	0,050
20	0	0,043	0,046	0,094	0,048
	45	0,055	0,059	0,080	0,065
	90	0,054	0,074	0,073	0,067
	135	0,048	0,064	0,067	0,060
Średnia – Mean		0,050	0,061	0,079	0,060
40	0	0,065	0,101	0,137	0,101
	45	0,062	0,071	0,123	0,085
	90	0,062	0,080	0,097	0,080
	135	0,050	0,055	0,122	0,076
Średnia – Mean		0,060	0,078	0,120	0,086
60	0	0,079	0,121	0,140	0,113
	45	0,078	0,063	0,117	0,086
	90	0,074	0,055	0,119	0,083
	135	0,073	0,067	0,109	0,083
Średnia – Mean		0,076	0,077	0,121	0,091
80	0	0,128	0,091	0,119	0,113
	45	0,071	0,110	0,085	0,089
	90	0,066	0,093	0,143	0,101
	135	0,073	0,088	0,146	0,102
Średnia – Mean		0,085	0,096	0,123	0,101
Średnia dla dawki N Mean for N dose	0	0,071	0,082	0,109	0,087
	45	0,063	0,069	0,094	0,075
	90	0,058	0,070	0,098	0,075
	135	0,058	0,065	0,100	0,074
Średnia – Mean		0,063	0,072	0,100	0,078
NIR – LSD	A	0,003	0,004	0,003	
	B	0,004	0,003	0,002	
	B/A	0,005	0,007	0,004	
	A/B	0,006	0,007	0,004	

Tabela 16. Aktywność dehydrogenaz (DHA) w glebie pod uprawą pszenicy ozimej (mg TPF·g⁻¹ s.m.·24h⁻¹)Table 16. Dehydrogenases activity (DHA) in soil under winter wheat (mg TPF·g⁻¹ d.m.·24h⁻¹)

Dawka obornika (czynnik A) Dose of manure (factor A) (t·ha ⁻¹)	Dawka N (czynnik B) Dose of N (factor B) (kg·ha ⁻¹)	Termin pobierania próbek Date of sampling			Średnia Mean
		marzec March	maj May	lipiec July	
0	0	0,028	0,047	0,037	0,037
	40	0,029	0,053	0,038	0,040
	80	0,027	0,067	0,039	0,044
	120	0,026	0,060	0,038	0,041
Średnia – Mean		0,028	0,057	0,038	0,041
20	0	0,031	0,063	0,032	0,042
	40	0,029	0,056	0,042	0,042
	80	0,026	0,069	0,043	0,046
	120	0,027	0,069	0,041	0,046
Średnia – Mean		0,028	0,064	0,040	0,044
40	0	0,027	0,073	0,042	0,047
	40	0,028	0,079	0,041	0,049
	80	0,027	0,056	0,047	0,043
	120	0,027	0,074	0,051	0,051
Średnia – Mean		0,027	0,071	0,045	0,048
60	0	0,025	0,061	0,056	0,047
	40	0,033	0,072	0,061	0,055
	80	0,035	0,082	0,047	0,055
	120	0,033	0,059	0,053	0,048
Średnia – Mean		0,032	0,069	0,054	0,051
80	0	0,034	0,077	0,042	0,051
	40	0,038	0,066	0,041	0,048
	80	0,040	0,065	0,042	0,049
	120	0,034	0,066	0,047	0,049
Średnia – Mean		0,037	0,069	0,043	0,049
Średnia dla dawki N Mean for N dose	0	0,029	0,064	0,042	0,045
	40	0,031	0,065	0,045	0,047
	80	0,031	0,068	0,044	0,048
	120	0,029	0,066	0,046	0,047
Średnia – Mean		0,030	0,066	0,044	0,047
NIR–LSD	A	0,002	0,006	0,003	
	B	0,002	ni-ns	0,003	
	B/A	0,003	0,008	0,005	
	A/B	0,003	0,009	0,005	

ni-ns – różnica nieistotna – non-significant difference

Nawożenie azotem istotnie wpływało na aktywność tych enzymów w glebie pobranej w marcu i lipcu, chociaż nie wykazano ukierunkowanego działania azotu w tym zakresie, natomiast w próbkach pobranych w maju zależność ta nie była statystycznie istotna.

Aktywność dehydrogenaz w glebie pod uprawą jęczmienia jarego kształtowała się średnio w zakresie od 0,035 do 0,048 mg TPF·g⁻¹s.m.·24h⁻¹ i zwiększała się wraz ze wzrostem dawek obornika (tab. 17). Podczas wegetacji wpływ obornika na aktywność dehydrogenazową gleby był zróżnicowany. W marcu w glebie z obiektu kontrolnego oraz z obiektów, na których stosowano 20 i 40 t·ha⁻¹ obornika, aktywność enzymów utrzymywała się na poziomie 0,016 mg TPF·g⁻¹s.m.·24h⁻¹. Zwiększenie dawki obornika do 60 i 80 t·ha⁻¹ spowodowało istotny wzrost ich aktywności. W próbkach pobranych w maju stwierdzono podobną zależność jak w glebie pod uprawą pszenicy ozimej. Aktywność dehydrogenaz wzrastała istotnie wraz ze wzrostem dawki obornika do 60 t·ha⁻¹, a dalsze jej zwiększanie nie miało wpływu na zmiany aktywności enzymatycznej. Istotny wzrost aktywności dehydrogenazowej w glebie pobranej w lipcu spowodowało dopiero zastosowanie najwyższej dawki obornika. Nawożenie azotem w istotny sposób wpływało na aktywność dehydrogenaz w maju i lipcu. W maju nawożenie azotem spowodowało systematyczny wzrost aktywności tych enzymów wraz ze wzrostem jego dawki, natomiast w lipcu wpływ ten nie był wyraźnie ukierunkowany.

Wyniki przedstawione w tabeli 18 świadczą o tym, że w okresie wegetacji kukurydzy aktywność dehydrogenaz glebowych zależała od nawożenia obornikiem i zwiększała się wraz ze wzrostem jego dawek. W każdym z badanych terminów aplikacja obornika stymulowała aktywność tych enzymów. Największy wpływ w tym zakresie w glebie pobranej w maju miało zastosowanie najwyższej dawki obornika. Na tych obiektach wykazano o 18% wyższą aktywność dehydrogenaz w porównaniu z obiektami, na których nawozu nie stosowano. W pełni sezonu wegetacyjnego, w lipcu, nawożenie obornikiem wpływało w podobny sposób na kształtowanie się aktywności enzymatycznej, jednak istotny jej wzrost wykazano tylko po zastosowaniu 40 i 80 t·ha⁻¹. Analiza statystyczna wykazała, że w glebie pobranej we wrześniu wszystkie stosowane dawki obornika zwiększały aktywność dehydrogenazową, jednak zależność ta była istotna statystycznie wówczas, gdy zastosowano 60 i 80 t·ha⁻¹ tego nawozu. Na tych obiektach stwierdzono wzrost aktywności enzymów średnio o 35% w porównaniu z obiektem nie nawożonym obornikiem. Istotny statystycznie okazał się wpływ nawożenia azotem na aktywność dehydrogenazową tylko w glebie pobranej w maju. Każda z zastosowanych dawek istotnie obniżyła aktywność enzymów w porównaniu z obiektem, na którym tego składnika nie stosowano.

Tabela 17. Aktywność dehydrogenaz (DHA) w glebie pod uprawą jęczmienia jarego (mg TPF·g⁻¹ s.m.·24h⁻¹)Table 17. Dehydrogenases activity (DHA) in soil under spring barley (mg TPF·g⁻¹ d.m.·24h⁻¹)

Dawka obornika (czynnik A) Dose of manure (factor A) (t·ha ⁻¹)	Dawka N (czynnik B) Dose of N (factor B) (kg·ha ⁻¹)	Termin pobierania próbek Date of sampling			Średnia Mean
		marzec March	maj May	lipiec July	
0	0	0,017	0,052	0,025	0,031
	40	0,015	0,061	0,023	0,033
	80	0,014	0,075	0,022	0,037
	120	0,016	0,073	0,021	0,037
Średnia – Mean		0,016	0,065	0,023	0,035
20	0	0,018	0,076	0,025	0,040
	40	0,014	0,065	0,025	0,035
	80	0,014	0,064	0,024	0,034
	120	0,017	0,083	0,022	0,041
Średnia – Mean		0,016	0,072	0,024	0,038
40	0	0,016	0,070	0,020	0,035
	40	0,015	0,072	0,024	0,037
	80	0,017	0,088	0,025	0,043
	120	0,015	0,095	0,022	0,044
Średnia – Mean		0,016	0,081	0,023	0,040
60	0	0,019	0,094	0,021	0,045
	40	0,019	0,101	0,022	0,047
	80	0,017	0,102	0,025	0,048
	120	0,018	0,091	0,026	0,045
Średnia – Mean		0,018	0,097	0,024	0,046
80	0	0,014	0,100	0,026	0,047
	40	0,021	0,096	0,026	0,048
	80	0,020	0,097	0,027	0,048
	120	0,020	0,090	0,030	0,047
Średnia – Mean		0,019	0,096	0,027	0,048
Średnia dla dawki N Mean for N dose	0	0,017	0,078	0,023	0,039
	40	0,017	0,079	0,024	0,040
	80	0,016	0,085	0,025	0,042
	120	0,017	0,086	0,024	0,042
Średnia – Mean		0,017	0,082	0,024	0,041
NIR – LSD	A	0,001	0,003	0,002	
	B	ni-ns	0,002	0,001	
	B/A	0,002	0,005	0,003	
	A/B	0,003	0,006	0,003	

ni-ns – różnica nieistotna – non-significant difference

Tabela 18. Aktywność dehydrogenaz (DHA) w glebie pod uprawą kukurydzy
(mg TPF·g⁻¹ s.m.·24h⁻¹)

Table 18. Dehydrogenases activity (DHA) in soil under maize (mg TPF·g⁻¹ d.m.·24h⁻¹)

Dawka obornika (czynnik A) Dose of manure (factor A) (t·ha ⁻¹)	Dawka N (czynnik B) Dose of N (factor B) (kg·ha ⁻¹)	Termin pobierania próbek Date of sampling			Średnia Mean
		maj May	lipiec July	wrzesień September	
0	0	0,055	0,018	0,045	0,039
	45	0,047	0,017	0,046	0,037
	90	0,046	0,017	0,051	0,038
	135	0,045	0,016	0,049	0,037
Średnia – Mean		0,048	0,017	0,048	0,038
20	0	0,054	0,018	0,054	0,042
	45	0,051	0,017	0,049	0,039
	90	0,050	0,020	0,050	0,040
	135	0,048	0,021	0,053	0,041
Średnia – Mean		0,051	0,018	0,052	0,041
40	0	0,060	0,020	0,060	0,047
	45	0,055	0,019	0,059	0,044
	90	0,052	0,024	0,059	0,045
	135	0,045	0,021	0,059	0,042
Średnia – Mean		0,053	0,021	0,059	0,045
60	0	0,074	0,021	0,070	0,055
	45	0,046	0,021	0,061	0,043
	90	0,050	0,019	0,065	0,045
	135	0,053	0,020	0,064	0,046
Średnia – Mean		0,055	0,020	0,065	0,047
80	0	0,055	0,021	0,065	0,047
	45	0,063	0,022	0,062	0,049
	90	0,051	0,024	0,057	0,044
	135	0,062	0,024	0,075	0,054
Średnia – Mean		0,057	0,023	0,065	0,049
Średnia dla dawki N Mean for N dose	0	0,060	0,020	0,059	0,046
	45	0,052	0,019	0,055	0,042
	90	0,050	0,021	0,056	0,042
	135	0,051	0,020	0,060	0,044
Średnia – Mean		0,053	0,020	0,058	0,044
NIR – LSD	A	0,002	0,004	0,004	
	B	0,001	ni-ns	ni-ns	
	B/A	0,003	0,002	0,002	
	A/B	0,003	0,003	0,003	

ni-ns – różnica nieistotna – non-significant difference

3.5.2. Aktywność peroksydaz

Wyniki przedstawione w tabeli 19 wskazują, że aktywność peroksydaz w trakcie wegetacji ziemniaka kształtowała się średnio na poziomie od 0,072 do 0,137 mg purpurogalliny·g⁻¹ s.m.·h⁻¹ i zwiększała systematycznie wraz ze wzrostem dawek obornika. Podobną tendencję wykazano w próbkach gleby pobranej w maju na obiektach nawożonych obornikiem. Wzrost ten został udowodniony statystycznie. Aktywność peroksydaz na obiektach nawożonych największą dawką obornika była ponad 2-krotnie wyższa w porównaniu z oznaczoną w glebie, na której tego nawozu nie stosowano. Istotny wzrost aktywności enzymatycznej w glebie pobranej w lipcu i we wrześniu wykazano począwszy od dawki obornika 40 t·ha⁻¹; największą aktywność stwierdzono na obiektach, na których zastosowano jego najwyższą dawkę. Nawożenie azotem istotnie wpływało na aktywność peroksydaz. W glebie pobranej w maju z obiektów nawożonych azotem wykazano niższą aktywność tych enzymów niż na obiekcie, na którym tego składnika nie stosowano. W lipcu i we wrześniu stwierdzono natomiast istotny wpływ azotu na aktywność peroksydaz glebowych, chociaż nie wykazano wyraźnego ukierunkowania w tym zakresie.

W okresie wegetacji pszenicy ozimej średnia aktywność peroksydaz wzrosła wraz ze wzrostem dawki obornika (tab. 20). W każdym z badanych terminów nawożenie obornikiem stymulowało aktywność tych enzymów, jednak analiza statystyczna wykazała istotny wpływ tego nawozu w glebie pobranej w marcu i lipcu. Największy wpływ w tym zakresie stwierdzono po zastosowaniu 80 t·ha⁻¹ obornika. Na tych obiektach aktywność enzymatyczna zwiększyła się odpowiednio 1,6 i 1,8 razy w porównaniu z glebą, na której obornika nie stosowano. Aktywność peroksydaz w glebie pobranej w maju zwiększyła się istotnie tylko po zastosowaniu najwyższej dawki tego nawozu. W trakcie wegetacji pszenicy ozimej nie stwierdzono istotnego wpływu nawożenia azotem na aktywność peroksydaz w glebie.

W glebie, na której uprawiano jęczmień jary, aktywność peroksydaz średnio w sezonie wegetacyjnym nie przekraczała 0,095 mg purpurogalliny·g⁻¹ s.m.·h⁻¹. Nawożenie obornikiem zwiększało systematycznie aktywność peroksydaz wraz ze wzrostem jego dawek (tab. 21). Na początku okresu wegetacyjnego, w marcu, wykazano istotne zwiększenie aktywności tych enzymów wraz ze wzrostem dawki nawozu naturalnego. Największy wpływ w tym zakresie stwierdzono po zastosowaniu jego najwyższej dawki. Podobną tendencję stwierdzono w odniesieniu do próbek gleby pobranych w maju, ale statystycznie istotne różnice wykazano na obiekcie, na którym stosowano 80 t·ha⁻¹ obornika. W lipcu wzrastające dawki obornika stymulowały również aktywność peroksydaz glebowych, jednak istotny wpływ tego nawozu wykazano wówczas, gdy był on stosowany w dawkach 60 i 80 t·ha⁻¹. Nie wykazano natomiast istotnego wpływu nawożenia azotem na aktywność peroksydaz w glebie.

W okresie wegetacyjnym kukurydzy średnia aktywność peroksydaz kształtowała się w zakresie od 0,068 do 0,101 mg purpurogalliny·g⁻¹ s.m.·h⁻¹ (tab. 22).

Tabela 19. Aktywność peroksydaz (PX) w glebie pod uprawą ziemniaka
(mg purpurogalliny·g⁻¹ s.m.·h⁻¹)

Table 19. Peroxidases activity (PX) in soil under potato (mg of purpurogallin·g⁻¹ d.m.·h⁻¹)

Dawka obornika (czynnik A) Dose of manure (factor A) (t·ha ⁻¹)	Dawka N (czynnik B) Dose of N (factor B) (kg·ha ⁻¹)	Termin pobierania próbek Date of sampling			Średnia Mean
		maj May	lipiec July	wrzesień September	
0	0	0,084	0,059	0,080	0,074
	45	0,078	0,061	0,058	0,066
	90	0,082	0,059	0,074	0,072
	135	0,087	0,070	0,071	0,076
Średnia – Mean		0,083	0,062	0,071	0,072
20	0	0,118	0,083	0,115	0,105
	45	0,099	0,070	0,090	0,086
	90	0,107	0,070	0,092	0,090
	135	0,115	0,089	0,107	0,104
Średnia – Mean		0,110	0,078	0,101	0,096
40	0	0,136	0,101	0,101	0,113
	45	0,134	0,077	0,115	0,109
	90	0,133	0,080	0,096	0,103
	135	0,137	0,087	0,117	0,114
Średnia – Mean		0,135	0,086	0,107	0,110
60	0	0,161	0,088	0,132	0,127
	45	0,155	0,088	0,097	0,113
	90	0,159	0,088	0,125	0,124
	135	0,138	0,088	0,085	0,104
Średnia – Mean		0,153	0,088	0,110	0,117
80	0	0,184	0,110	0,132	0,142
	45	0,169	0,100	0,148	0,139
	90	0,175	0,089	0,142	0,135
	135	0,177	0,107	0,116	0,133
Średnia – Mean		0,176	0,102	0,135	0,137
Średnia dla dawki N Mean for N dose	0	0,137	0,088	0,112	0,112
	45	0,127	0,079	0,122	0,109
	90	0,131	0,077	0,106	0,105
	135	0,131	0,088	0,099	0,106
Średnia – Mean		0,132	0,083	0,110	0,108
NIR – LSD	A	0,010	0,024	0,032	
	B	0,007	0,010	0,013	
	B/A	ni-ns	ni-ns	ni-ns	
	A/B	ni-ns	ni-ns	ni-ns	

ni-ns – różnica nieistotna – non-significant difference

Tabela 20. Aktywność peroksydaz (PX) w glebie pod uprawą pszenicy ozimej
(mg purpurogalliny·g⁻¹s.m·h⁻¹)Table 20. Peroxidases activity (PX) in soil under winter wheat
(mg of purpurogallin·g⁻¹d.m·h⁻¹)

Dawka obornika (czynnik A) Dose of manure (factor A) (t·ha ⁻¹)	Dawka N (czynnik B) Dose of N (factor B) (kg·ha ⁻¹)	Termin pobierania próbek Date of sampling			Średnia Mean
		marzec March	maj May	lipiec July	
0	0	0,067	0,092	0,059	0,073
	40	0,056	0,091	0,059	0,069
	80	0,059	0,083	0,057	0,066
	120	0,070	0,080	0,060	0,070
Średnia – Mean		0,063	0,087	0,059	0,070
20	0	0,077	0,090	0,074	0,080
	40	0,081	0,088	0,078	0,082
	80	0,083	0,099	0,078	0,087
	120	0,100	0,086	0,077	0,088
Średnia – Mean		0,085	0,091	0,077	0,084
40	0	0,084	0,087	0,086	0,086
	40	0,083	0,095	0,088	0,089
	80	0,081	0,096	0,088	0,088
	120	0,081	0,098	0,085	0,088
Średnia – Mean		0,082	0,094	0,087	0,088
60	0	0,087	0,117	0,094	0,099
	40	0,082	0,095	0,100	0,092
	80	0,080	0,082	0,099	0,087
	120	0,084	0,093	0,098	0,092
Średnia – Mean		0,083	0,097	0,098	0,093
80	0	0,101	0,107	0,105	0,100
	40	0,107	0,127	0,105	0,113
	80	0,088	0,123	0,104	0,105
	120	0,102	0,140	0,103	0,115
Średnia – Mean		0,100	0,124	0,104	0,108
Średnia dla dawki N Mean for N dose	0	0,082	0,099	0,084	0,088
	40	0,082	0,099	0,086	0,089
	80	0,078	0,097	0,085	0,087
	120	0,087	0,099	0,085	0,090
Średnia – Mean		0,082	0,099	0,085	0,089
NIR – LSD	A	0,009	0,011	0,004	
	B	ni-ns	ni-ns	ni-ns	
	B/A	ni-ns	0,023	0,010	
	A/B	ni-ns	0,024	0,006	

ni-ns – różnica nieistotna – non-significant difference

Tabela 21. Aktywność peroksydaz (PX) w glebie pod uprawą jęczmienia jarego
(mg purpurogalliny·g⁻¹ s.m.·h⁻¹)

Table 21. Peroxidases activity (PX) in soil under spring barley
(mg of purpurogallin·g⁻¹ d.m.·h⁻¹)

Dawka obornika (czynnik A) Dose of manure (factor A) (t·ha ⁻¹)	Dawka N (czynnik B) Dose of N (factor B) (kg·ha ⁻¹)	Termin pobierania próbek Date of sampling			Średnia Mean
		marzec March	maj May	lipiec July	
0	0	0,055	0,069	0,056	0,060
	40	0,048	0,075	0,054	0,059
	80	0,050	0,069	0,053	0,057
	120	0,056	0,077	0,055	0,063
Średnia – Mean		0,052	0,073	0,055	0,060
20	0	0,060	0,074	0,068	0,067
	40	0,071	0,082	0,067	0,073
	80	0,060	0,075	0,059	0,065
	120	0,063	0,078	0,062	0,068
Średnia – Mean		0,064	0,077	0,064	0,068
40	0	0,069	0,081	0,063	0,071
	40	0,070	0,082	0,065	0,072
	80	0,063	0,084	0,066	0,071
	120	0,065	0,067	0,062	0,065
Średnia – Mean		0,067	0,079	0,064	0,070
60	0	0,069	0,093	0,084	0,082
	40	0,078	0,080	0,075	0,078
	80	0,084	0,084	0,073	0,080
	120	0,073	0,084	0,061	0,073
Średnia – Mean		0,076	0,085	0,073	0,078
80	0	0,091	0,099	0,082	0,091
	40	0,100	0,111	0,097	0,103
	80	0,095	0,103	0,083	0,094
	120	0,088	0,082	0,108	0,093
Średnia – Mean		0,094	0,099	0,093	0,095
Średnia dla dawki N Mean for N dose	0	0,067	0,083	0,071	0,074
	40	0,073	0,086	0,072	0,077
	80	0,070	0,083	0,067	0,073
	120	0,069	0,078	0,070	0,072
Średnia – Mean		0,070	0,083	0,070	0,074
NIR – LSD	A	0,008	0,025	0,015	
	B	ni-ns	ni-ns	ni-ns	
	B/A	ni-ns	ni-ns	ni-ns	
	A/B	ni-ns	ni-ns	ni-ns	

ni-ns – różnica nieistotna – non-significant difference

Tabela 22. Aktywność peroksydaz (PX) w glebie pod uprawą kukurydzy
(mg purpurogalliny·g⁻¹ s.m.·h⁻¹)Table 22. Peroxidases activity (PX) in soil under maize (mg of purpurogallin·g⁻¹ d.m.·h⁻¹)

Dawka obornika (czynnik A) Dose of manure (factor A) (t·ha ⁻¹)	Dawka N (czynnik B) Dose of N (factor B) (kg·ha ⁻¹)	Termin pobierania próbek Date of sampling			Średnia Mean
		maj May	lipiec July	wrzesień September	
0	0	0,078	0,068	0,061	0,069
	45	0,080	0,065	0,065	0,070
	90	0,080	0,063	0,070	0,071
	135	0,066	0,066	0,051	0,061
Średnia – Mean		0,076	0,066	0,062	0,068
20	0	0,087	0,079	0,074	0,080
	45	0,079	0,082	0,069	0,077
	90	0,086	0,085	0,066	0,079
	135	0,088	0,075	0,076	0,080
Średnia – Mean		0,085	0,080	0,071	0,079
40	0	0,089	0,083	0,084	0,085
	45	0,075	0,089	0,070	0,078
	90	0,097	0,080	0,088	0,088
	135	0,113	0,083	0,102	0,099
Średnia – Mean		0,094	0,084	0,086	0,088
60	0	0,108	0,085	0,098	0,097
	45	0,092	0,078	0,088	0,086
	90	0,093	0,088	0,081	0,087
	135	0,086	0,086	0,085	0,086
Średnia – Mean		0,095	0,084	0,088	0,089
80	0	0,114	0,098	0,109	0,107
	45	0,123	0,101	0,110	0,111
	90	0,097	0,099	0,093	0,096
	135	0,091	0,099	0,082	0,091
Średnia – Mean		0,106	0,099	0,099	0,101
Średnia dla dawki N Mean for N dose	0	0,095	0,083	0,085	0,088
	45	0,090	0,083	0,080	0,084
	90	0,091	0,083	0,080	0,085
	135	0,089	0,082	0,079	0,083
Średnia – Mean		0,091	0,083	0,081	0,085
NIR – LSD	A	0,012	0,009	0,014	
	B	0,006	ni-ns	ni-ns	
	B/A	0,028	ni-ns	0,025	
	A/B	0,030	ni-ns	0,026	

ni-ns – różnica nieistotna – non-significant difference

Zwiększające się dawki obornika stymulowały aktywność peroksydaz w trakcie wegetacji roślin. W glebie pobranej w maju i we wrześniu wzrastała ona istotnie począwszy od dawki $40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ obornika, przy czym największą wykazano na obiektach nawożonych najwyższą dawką tego nawozu. W lipcu natomiast każda z dawek obornika w istotny sposób stymulowała aktywność peroksydaz, a największy wpływ w tym zakresie stwierdzono po zastosowaniu $80 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ nawozu. Nawożenie azotem wpływało na aktywność peroksydaz tylko w glebie pobranej w maju. Aktywność enzymatyczna obniżała się wraz ze wzrostem dawki azotu w glebie, jednak istotną zależność wykazano po zastosowaniu najwyższej dawki tego składnika.

3.5.3. Aktywność katalazy

Przedstawione w tabeli 23 dane wskazują na to, że w glebie, na której uprawiano ziemniaki, średnia aktywność katalazy nie przekraczała $0,080 \text{ mg H}_2\text{O}_2\cdot\text{g}^{-1} \text{ s.m.}\cdot\text{min}^{-1}$. Aktywność tego enzymu wzrastała wraz ze zwiększającymi się dawkami obornika. Podobny wpływ nawożenia obornikiem na aktywność enzymatyczną wykazano w glebie pobranej w maju. Aktywność katalazy istotnie wzrastała począwszy od dawki $40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ obornika. Wyniki badań gleby pobranej w lipcu również świadczą o istotnym wpływie nawożenia obornikiem na aktywność katalazy, jednak nie był on wyraźnie ukierunkowany. We wrześniu każda z dawek obornika istotnie stymulowała aktywność tego enzymu w glebie, a największy wpływ wykazano po zastosowaniu $40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ obornika. Zwiększenie dawek obornika do 60 i $80 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ spowodowało niewielkie obniżenie aktywności enzymatycznej. W glebie pobranej w maju nawożenie 90 i $135 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$ w istotny sposób obniżyło aktywność katalazy w porównaniu z obiektem, na którym tego składnika nie stosowano, nie miało natomiast wpływu na aktywność katalazy w glebie pobranej w lipcu. We wrześniu wykazano istotny wpływ tego składnika na aktywność katalazową, jednak nie wykazano ukierunkowanego działania azotu w tym zakresie.

Aktywność katalazy w glebie, w okresie wegetacji pszenicy ozimej, kształtowała się średnio od $0,100$ do $0,119 \text{ mg H}_2\text{O}_2\cdot\text{g}^{-1} \text{ s.m.}\cdot\text{min}^{-1}$ (tab. 24) i wzrastała wraz ze zwiększającymi się dawkami obornika. Podobną tendencję wykazano w odniesieniu do gleby pobranej w marcu i lipcu, jednak istotny stymulujący wpływ obornika na aktywność katalazową stwierdzono jedynie na obiektach, na których nawóz ten stosowano w dawkach 60 i $80 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Analiza statystyczna nie wykazała istotnego oddziaływania nawożenia obornikiem na aktywność tego enzymu w glebie pobranej w maju. Nawożenie azotem również nie miało istotnego wpływu na aktywność katalazy w glebie w czasie wegetacji pszenicy ozimej.

W trakcie wegetacji jęczmienia jarego aktywność katalazy nie przekraczała średnio $0,086 \text{ mg H}_2\text{O}_2\cdot\text{g}^{-1} \text{ s.m.}\cdot\text{min}^{-1}$ i zwiększała się systematycznie wraz ze wzrostem dawki obornika (tab. 25).

Tabela 23. Aktywność katalazy (CAT) w glebie pod uprawą ziemniaka
($\text{mg H}_2\text{O}_2 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{s.m.} \cdot \text{min}^{-1}$)Table 23. Catalase activity (CAT) in soil under potato ($\text{mg H}_2\text{O}_2 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d.m.} \cdot \text{min}^{-1}$)

Dawka obornika (czynnik A) Dose of manure (factor A) ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$)	Dawka N (czynnik B) Dose of N (factor B) ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$)	Termin pobierania próbek Date of sampling			Średnia Mean
		maj May	lipiec July	wrzesień September	
0	0	0,068	0,032	0,111	0,070
	45	0,068	0,041	0,104	0,071
	90	0,064	0,047	0,109	0,073
	135	0,066	0,055	0,115	0,079
Średnia – Mean		0,067	0,044	0,110	0,073
20	0	0,066	0,047	0,119	0,077
	45	0,070	0,034	0,113	0,072
	90	0,077	0,034	0,113	0,075
	135	0,060	0,030	0,123	0,071
Średnia – Mean		0,068	0,036	0,117	0,074
40	0	0,079	0,030	0,124	0,078
	45	0,073	0,039	0,128	0,080
	90	0,066	0,043	0,119	0,076
	135	0,068	0,051	0,123	0,081
Średnia – Mean		0,072	0,041	0,124	0,079
60	0	0,077	0,037	0,124	0,079
	45	0,074	0,051	0,122	0,082
	90	0,068	0,034	0,121	0,074
	135	0,066	0,041	0,126	0,078
Średnia – Mean		0,071	0,041	0,123	0,078
80	0	0,070	0,052	0,124	0,082
	45	0,077	0,047	0,119	0,081
	90	0,070	0,045	0,115	0,077
	135	0,077	0,043	0,121	0,080
Średnia – Mean		0,074	0,047	0,120	0,080
Średnia dla dawki N Mean for N dose	0	0,072	0,040	0,120	0,077
	45	0,072	0,042	0,117	0,077
	90	0,069	0,041	0,115	0,075
	135	0,067	0,044	0,122	0,078
Średnia – Mean		0,070	0,042	0,119	0,077
NIR – LSD	A	0,003	0,005	0,004	
	B	0,001	ni-ns	0,005	
	B/A	0,006	0,011	0,006	
	A/B	0,007	0,012	0,006	

ni-ns – różnica nieistotna – non-significant difference

Tabela 24. Aktywność katalazy (CAT) w glebie pod uprawą pszenicy ozimej
($\text{mg H}_2\text{O}_2 \cdot \text{g}^{-1} \text{s.m.} \cdot \text{min}^{-1}$)

Table 24. Catalase activity (CAT) in soil under winter wheat ($\text{mg H}_2\text{O}_2 \cdot \text{g}^{-1} \text{d.m.} \cdot \text{min}^{-1}$)

Dawka obornika (czynnik A) Dose of manure (factor A) ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$)	Dawka N (czynnik B) Dose of N (factor B) ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$)	Termin pobierania próbek Date of sampling			Średnia Mean
		marzec March	maj May	lipiec July	
0	0	0,060	0,063	0,169	0,097
	40	0,063	0,073	0,154	0,097
	80	0,065	0,081	0,149	0,098
	120	0,068	0,081	0,170	0,106
Średnia – Mean		0,064	0,075	0,161	0,100
20	0	0,074	0,083	0,164	0,107
	40	0,065	0,086	0,188	0,113
	80	0,062	0,073	0,191	0,109
	120	0,067	0,068	0,185	0,107
Średnia – Mean		0,067	0,078	0,182	0,109
40	0	0,062	0,089	0,186	0,112
	40	0,064	0,085	0,183	0,111
	80	0,065	0,083	0,169	0,106
	120	0,068	0,089	0,170	0,109
Średnia – Mean		0,065	0,087	0,177	0,110
60	0	0,072	0,096	0,192	0,120
	40	0,070	0,089	0,186	0,115
	80	0,067	0,085	0,193	0,115
	120	0,071	0,089	0,191	0,117
Średnia – Mean		0,070	0,090	0,191	0,117
80	0	0,076	0,094	0,197	0,122
	40	0,076	0,083	0,195	0,118
	80	0,076	0,088	0,189	0,118
	120	0,071	0,094	0,192	0,119
Średnia – Mean		0,075	0,090	0,193	0,119
Średnia dla dawki N Mean for N dose	0	0,069	0,085	0,182	0,112
	40	0,068	0,083	0,181	0,111
	80	0,067	0,082	0,178	0,109
	120	0,069	0,084	0,182	0,112
Średnia – Mean		0,068	0,084	0,181	0,111
NIR – LSD	A	0,005	ni-ns	0,027	
	B	ni-ns	ni-ns	ni-ns	
	B/A	ni-ns	0,016	0,014	
	A/B	ni-ns	0,017	0,015	

ni-ns – różnica nieistotna – non-significant difference

Tabela 25. Aktywność katalazy (CAT) w glebie pod uprawą jęczmienia jarego
($\text{mg H}_2\text{O}_2 \cdot \text{g}^{-1} \text{ s.m.} \cdot \text{min}^{-1}$)Table 25. Catalase activity (CAT) in soil under spring barley ($\text{mg H}_2\text{O}_2 \cdot \text{g}^{-1} \text{ d.m.} \cdot \text{min}^{-1}$)

Dawka obornika (czynnik A) Dose of manure (factor A) ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$)	Dawka N (czynnik B) Dose of N (factor B) ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$)	Termin pobierania próbek Date of sampling			Średnia Mean
		marzec March	maj May	lipiec July	
0	0	0,019	0,016	0,067	0,034
	40	0,031	0,012	0,069	0,037
	80	0,017	0,036	0,076	0,043
	120	0,015	0,052	0,083	0,050
Średnia – Mean		0,021	0,029	0,074	0,041
20	0	0,023	0,042	0,096	0,054
	40	0,022	0,058	0,073	0,051
	80	0,020	0,038	0,096	0,051
	120	0,024	0,065	0,094	0,061
Średnia – Mean		0,022	0,051	0,090	0,054
40	0	0,059	0,063	0,107	0,076
	40	0,054	0,067	0,104	0,075
	80	0,053	0,073	0,097	0,074
	120	0,050	0,078	0,099	0,076
Średnia – Mean		0,054	0,070	0,102	0,075
60	0	0,077	0,078	0,098	0,084
	40	0,086	0,078	0,099	0,088
	80	0,030	0,078	0,108	0,072
	120	0,038	0,085	0,107	0,077
Średnia – Mean		0,058	0,080	0,103	0,080
80	0	0,056	0,079	0,108	0,081
	40	0,056	0,091	0,103	0,083
	80	0,065	0,092	0,104	0,087
	120	0,079	0,088	0,109	0,092
Średnia – Mean		0,064	0,088	0,106	0,086
Średnia dla dawki N Mean for N dose	0	0,047	0,056	0,095	0,066
	40	0,050	0,061	0,090	0,067
	80	0,037	0,063	0,096	0,065
	120	0,041	0,074	0,098	0,071
Średnia – Mean		0,044	0,064	0,095	0,067
NIR – LSD	A	0,008	0,020	0,022	
	B	0,006	0,009	0,004	
	B/A	0,013	0,020	ni-ns	
	A/B	0,014	0,022	ni-ns	

ni-ns – różnica nieistotna – non-significant difference

Tabela 26. Aktywność katalazy (CAT) w glebie pod uprawą kukurydzy
($\text{mg H}_2\text{O}_2 \cdot \text{g}^{-1} \text{ s.m.} \cdot \text{min}^{-1}$)

Table 26. Catalase activity (CAT) in soil under maize ($\text{mg H}_2\text{O}_2 \cdot \text{g}^{-1} \text{ d.m.} \cdot \text{min}^{-1}$)

Dawka obornika (czynnik A) Dose of manure (factor A) ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$)	Dawka N (czynnik B) Dose of N (factor B) ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$)	Termin pobierania próbek Date of sampling			Średnia Mean
		maj May	lipiec July	wrzesień September	
0	0	0,043	0,077	0,062	0,061
	45	0,049	0,079	0,062	0,063
	90	0,047	0,068	0,068	0,061
	135	0,055	0,079	0,066	0,067
Średnia – Mean		0,049	0,076	0,065	0,063
20	0	0,049	0,077	0,070	0,065
	45	0,045	0,079	0,070	0,065
	90	0,051	0,079	0,070	0,067
	135	0,053	0,083	0,081	0,072
Średnia – Mean		0,050	0,080	0,073	0,067
40	0	0,053	0,081	0,075	0,070
	45	0,051	0,089	0,087	0,076
	90	0,053	0,087	0,079	0,073
	135	0,049	0,092	0,074	0,072
Średnia – Mean		0,052	0,087	0,079	0,073
60	0	0,060	0,087	0,077	0,075
	45	0,066	0,096	0,074	0,079
	90	0,057	0,098	0,075	0,077
	135	0,053	0,098	0,079	0,077
Średnia – Mean		0,059	0,095	0,076	0,077
80	0	0,057	0,092	0,083	0,077
	45	0,055	0,089	0,083	0,076
	90	0,060	0,098	0,079	0,079
	135	0,055	0,094	0,081	0,077
Średnia – Mean		0,057	0,093	0,082	0,077
Średnia dla dawki N Mean for N dose	0	0,052	0,083	0,073	0,069
	45	0,053	0,086	0,075	0,071
	90	0,054	0,086	0,074	0,071
	135	0,053	0,089	0,076	0,073
Średnia – Mean		0,053	0,086	0,075	0,071
NIR – LSD	A	0,004	0,002	0,004	
	B	ni-ns	0,004	ni-ns	
	B/A	0,006	0,005	0,005	
	A/B	0,006	0,005	0,006	

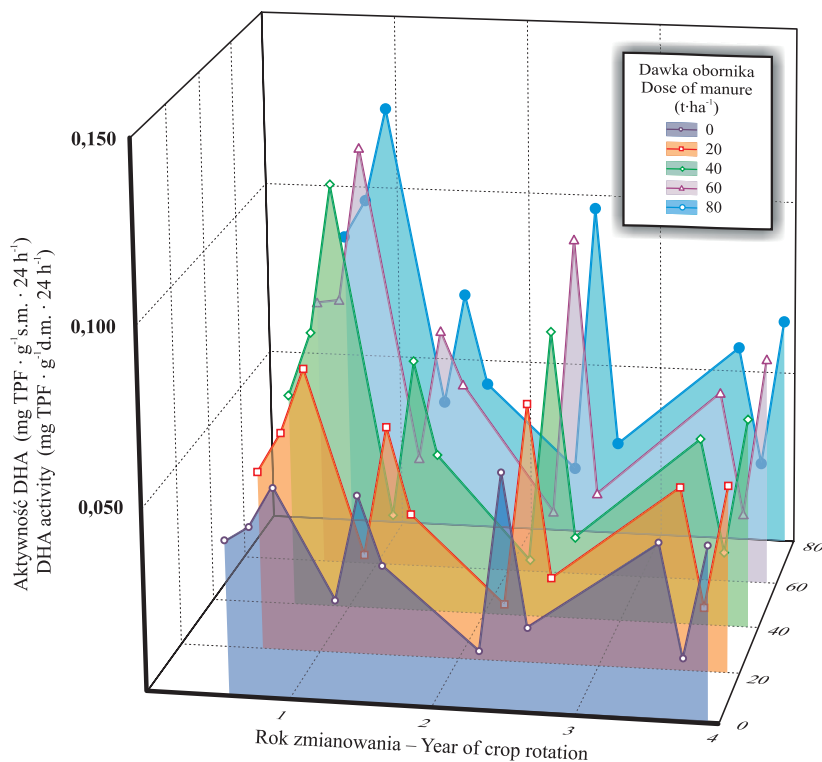
ni-ns – różnica nieistotna – non-significant difference

We wszystkich terminach pobierania próbek wykazano podobny wpływ obornika na aktywność katalazy w glebie. W marcu aktywność tego enzymu istotnie wzrastała począwszy od dawki obornika $40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, a najwyższą określono na obiektach, na których zastosowano największą jego dawkę. Podobnie kształtowała się aktywność katalazy w glebie pobranej w maju, a istotny wpływ nawozu wykazano już od dawki $20 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. W obu terminach pobierania próbek aktywność katalazy na obiektach nawożonych $80 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ obornika była 3-krotnie wyższa niż na obiekcie kontrolnym. W glebie pobranej w lipcu jedynie obornik zastosowany w dawce $20 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ nie wpływał istotnie na zmianę aktywności katalazowej, natomiast pozostałe dawki tego nawozu istotnie ją zwiększyły. Największy przyrost aktywności tego enzymu – o ponad 40% – wykazano na obiekcie, na którym zastosowano największą dawkę nawozu. Nawożenie azotem w istotny sposób wpływało na aktywność katalazy w glebie w okresie wegetacji jęczmienia jarego. W glebie pobranej w maju i lipcu aktywność katalazy zwiększyła się zwłaszcza wówczas, gdy składnik ten stosowano w dawkach 80 i $120 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Aktywność katalazy w glebie, na której uprawiano kukurydzę, kształtowała się średnio od $0,063$ do $0,077 \text{ mg H}_2\text{O}_2\cdot\text{g}^{-1} \text{ s.m.}\cdot\text{min}^{-1}$ (tab. 26) i zwiększała się systematycznie do dawki obornika $60 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Podobną tendencję do większej aktywności tego enzymu na obiektach nawożonych obornikiem wykazano w glebie pobranej w maju. Istotny jednak wzrost – średnio o 18% w stosunku do gleby kontrolnej – wykazano na obiektach, na których stosowano 60 i $80 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ obornika. W glebie pobranej w lipcu każda z dawek obornika w istotny sposób zwiększała aktywność katalazy, a największy wpływ w tym zakresie wykazano po zastosowaniu 60 i $80 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ obornika. Stymulujący wpływ nawożenia obornikiem na aktywność katalazową gleby wykazano także we wrześniu, chociaż na obiekcie, na którym nawóz ten stosowano w dawce $60 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, aktywność enzymatyczna nieznacznie się obniżyła. Nawożenie azotem nie miało wpływu na aktywność katalazy w glebie w maju i we wrześniu, natomiast w lipcu aktywność tego enzymu zwiększyła się istotnie na obiekcie, na którym zastosowano największą dawkę tego składnika.

3.6. Dynamika aktywności badanych enzymów glebowych w zmianowaniu

Wielkość populacji i czynności życiowe drobnoustrojów podlegają w środowisku glebowym stałym wahaniom. Aktywność enzymatyczna gleby wykazywała wyraźną zmienność sezonową oraz znaczne fluktuacje, zależne głównie od warunków pogodowych, dostępności substratu oraz gatunku rośliny uprawianej w zmianowaniu. Zakres zmienności aktywności wszystkich enzymów porównywano więc z ich aktywnością na obiekcie kontrolnym. Dynamikę aktywności dehydrogenazowej (DHA) w warunkach doświadczenia przedstawia rysunek 7.

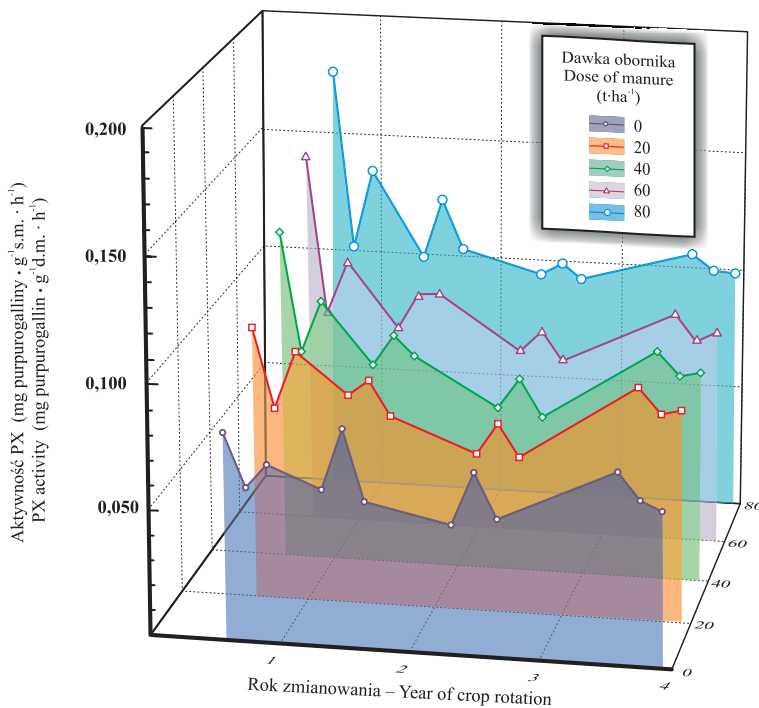


Rys. 7. Dynamika aktywności dehydrogenaz glebowych (DHA) w zależności od dawek obornika (średnio dla dawek azotu) w zmianowaniu

Fig. 7. Dynamics of soil dehydrogenases activity (DHA) depending on manure doses (mean for nitrogen doses) in crop rotation

Aktywność dehydrogenaz w glebie, na której nie stosowano obornika, zmieniała się w okresie badawczym od 0,008 do 0,065 mg TPF·g⁻¹ s.m.·24h⁻¹. Reakcja dehydrogenaz na zastosowane nawożenie naturalne miała podobny charakter w obiektach pod poszczególnymi roślinami w zmianowaniu. Należy podkreślić, że w glebie pobranej w pierwszym roku po zastosowaniu obornika aktywność enzymatyczna była najwyższa. Nawożenie obornikiem wyraźnie stymulowało aktywność dehydrogenazową gleby, a po zastosowaniu największej dawki zakres aktywności DHA wynosił od 0,014 do 0,123 mg TPF·g⁻¹ s.m.·24h⁻¹. Obserwacje dotyczące zmian sezonowych aktywności dehydrogenazowej świadczą o tym, że w glebie pobranej w pierwszym i czwartym roku po aplikacji obornika dehydrogenazy wykazywały największą aktywność jesienią. W drugim i trzecim roku, w trakcie uprawy pszenicy ozimej i jęczmienia jarego, dehydrogenazy były natomiast najbardziej aktywne w maju, na początku wegetacji roślin.

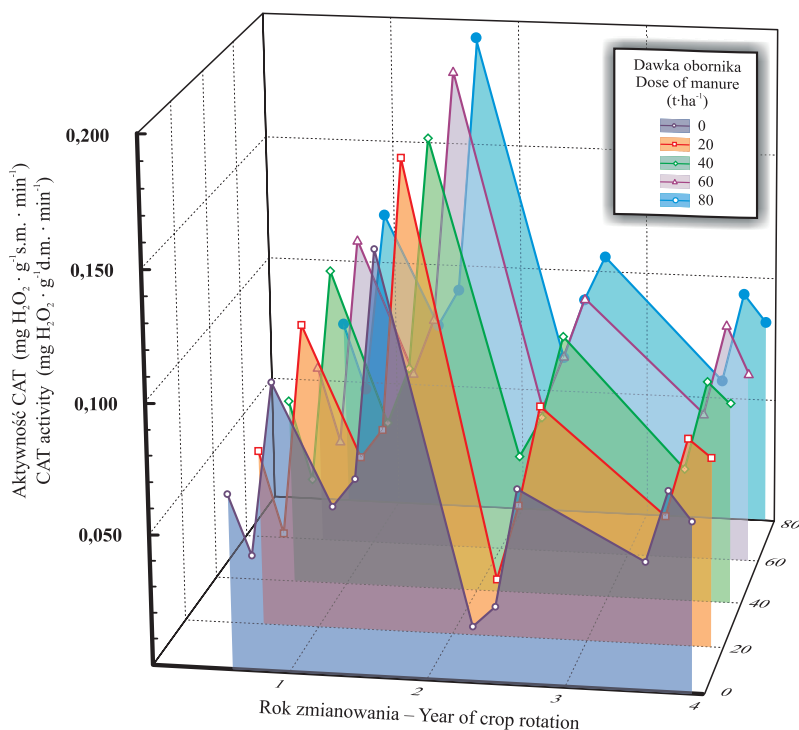
Dynamikę aktywności peroksydaz glebowych (PX) w zależności od nawożenia obornikiem w warunkach prowadzonych badań przedstawia rysunek 8.



Rys. 8. Dynamika aktywności peroksydaz glebowych (PX) w zależności od dawek obornika (średnio dla dawek azotu) w zmianowaniu
 Fig. 8. Dynamics of soil peroxidases activity (PX) depending on manure doses (mean for nitrogen doses) in crop rotation

Aktywność peroksydaz gleby kontrolnej zmieniała się od 0,054 do 0,087 mg purpurogalliny · g⁻¹ s.m. · h⁻¹. Maksymalne wartości aktywności peroksydaz wykazano w pierwszym roku po aplikacji obornika. Stwierdzono również stymulujący wpływ obornika na aktywność peroksydaz w glebie. Rozpatrując zmiany aktywności peroksydaz w trakcie sezonu wegetacyjnego należy podkreślić, że w okresie badawczym najwyższą ich aktywność określono w glebie pobranej w maju, na początku wegetacji roślin. Zauważono również tendencję obniżania się ich aktywności w trakcie zmianowania, chociaż w glebie pod uprawą kukurydzy, w czwartym roku po oborniku, aktywność ta znowu wzrosła.

W glebie nie nawożonej obornikiem aktywność katalazy (CAT) kształtowała się w zakresie od 0,021 do 0,161 mg H₂O₂ · g⁻¹ s.m. · min⁻¹ (rys. 9). Nawożenie obornikiem istotnie stymulowało jej aktywność w glebie wraz ze wzrostem jego dawek. Należy podkreślić, że aktywność tego enzymu zmieniała się w okresie badawczym, a tendencje zmian były podobne w glebie kontrolnej i nawożonej obornikiem. Najwyższą aktywność enzymu wykazano w glebie pod uprawą pszenicy ozimej w drugim roku po oborniku; w miarę upływu czasu ulegała ona zmniejszeniu. W okresie badawczym aktywność katalazy na ogół wzrastała znacznie pod koniec sezonu wegetacyjnego i była najwyższa w lipcu oraz wrześniu.



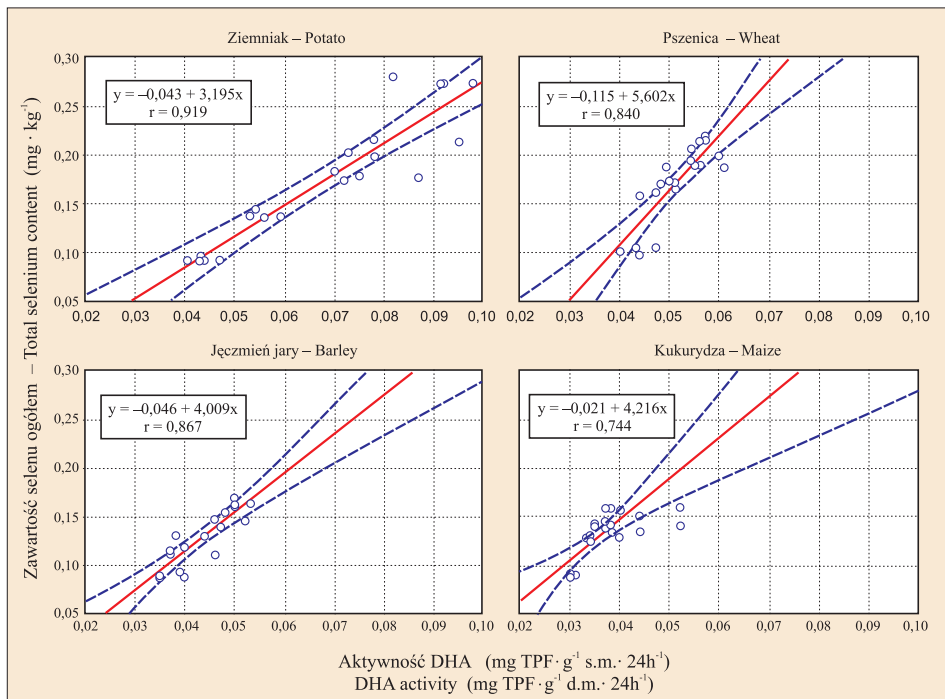
Rys. 9. Dynamika aktywności katalazy glebowej (CAT) w zależności od dawek obornika (średnio dla dawek azotu) w zmianowaniu

Fig. 9. Dynamics of soil catalase activity (CAT) depending on manure doses (mean for nitrogen doses) in crop rotation

3.7. Zależność między zawartością selenu w glebie a jej aktywnością enzymatyczną oraz podstawowymi właściwościami

W tej części pracy przedstawiono i omówiono zależności między zawartością selenu ogółem i jego badanych frakcji a aktywnością enzymatyczną gleby. Obliczono również współczynniki korelacji między zawartością tego pierwiastka a niektórymi właściwościami gleby. Aktywność dehydrogenaz w glebie pod uprawą ziemniaka, w pierwszym roku po oborniku, wykazywała wartości maksymalne po zastosowaniu najwyższych dawek tego nawozu (rys. 10). Wykazano silny liniowy związek między aktywnością enzymatyczną a zawartością selenu ogółem. Liniowe związki między zawartością selenu ogółem a aktywnością dehydrogenaz stwierdzono również w odniesieniu do gleby pod pozostałymi roślinami w zmianowaniu. W glebie pod uprawą pszenicy ozimej, w drugim roku po oborniku, maksymalna wartość aktywności dehydrogenaz stanowiła niewiele ponad połowę wartości maksymalnej, jaką wykazano w glebie pod uprawą ziemniaka (rys. 10). Znacznie niższa była też zawartość selenu ogółem. Stosunkowo silny związek obu porównywanych parametrów stwierdzono również w odnie-

sieniu do gleby spod uprawy jęczmienia jarego w trzecim roku po aplikacji obornika, jednak zarówno zakres obserwowanych wartości, jak i rozrzut punktów wypadkowych w układzie współrzędnych świadczą o znacznie mniejszym wpływie nawożenia obornikiem.

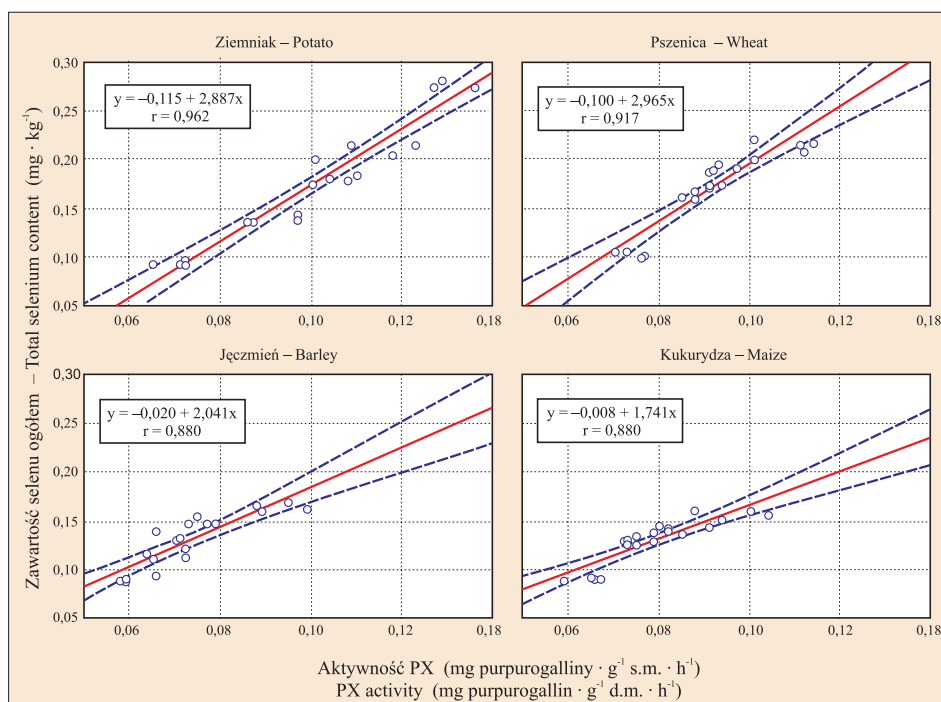


Rys. 10. Zależność między zawartością selenu ogółem a aktywnością dehydrogenaz w glebie (łącznie dla obiektów nawożonych obornikiem i azotem, średnio dla terminów pobierania próbek glebowych)

Fig. 10. Relationship between total selenium content and dehydrogenases activity in soil (total for manure and nitrogen treatments, mean for sampling date)

W glebie pod uprawą jęczmienia jarego zawartość selenu ogółem oraz aktywność dehydrogenaz była o połowę mniejsza niż w glebie pod uprawą ziemniaka. Najślabszy związek opisywanych zależności stwierdzono w glebie pod uprawą kukurydzy, w czwartym roku po oborniku (rys. 10), w której odnotowano zarówno najniższą aktywność dehydrogenaz i zawartość selenu ogółem w trakcie zmianowania, jak i słaby związek badanych parametrów z czynnikami doświadczenia.

Podobne zależności wykazano również między zawartością selenu ogółem a aktywnością peroksydaz glebowych (rys. 11).

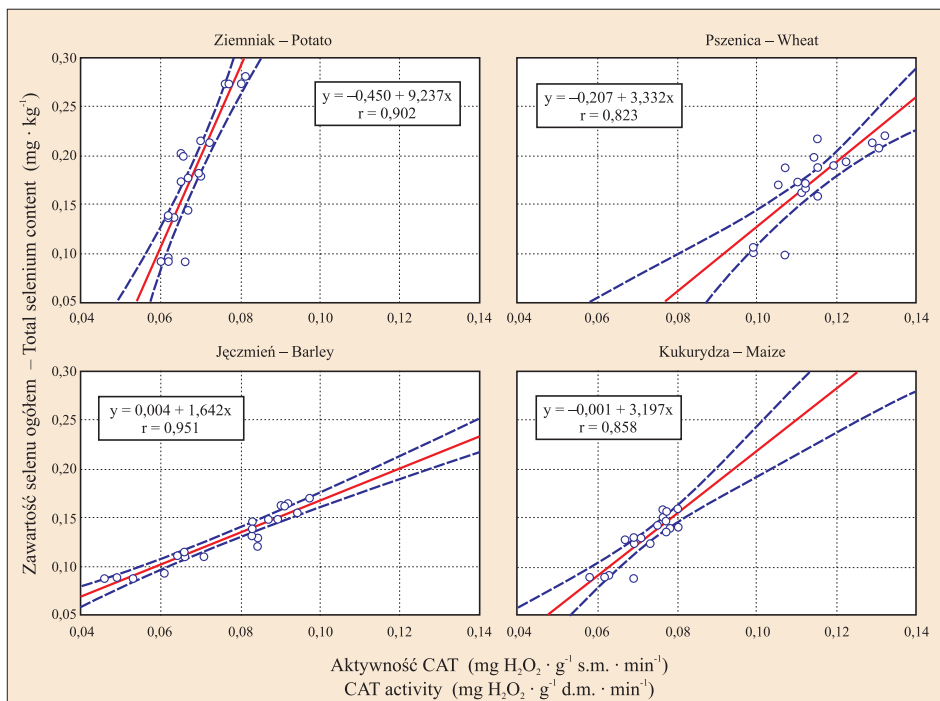


Rys. 11. Zależność między zawartością selenu ogółem a aktywnością peroksydaz w glebie (łącznie dla obiektów nawożonych obornikiem i azotem, średnio dla terminów pobierania próbek glebowych)

Fig. 11. Relationship between total selenium content and peroxidases activity in soil (total for manure and nitrogen treatments, mean for sampling date)

W glebie pod uprawą ziemniaka aktywność peroksydaz była najwyższa, przy jednoczesnym silnym związku liniowym z zawartością selenu ogółem. Podobne związki liniowe między obu badanymi parametrami wykazano także w odniesieniu do gleby pod uprawą pozostałych gatunków roślin w zmianowaniu. W drugim roku po zastosowaniu obornika aktywność peroksydaz obniżyła się. W glebie, na której uprawiano jęczmień jary, aktywność tych enzymów była niższa i nie uległa zmianie w roku następnym. Wraz ze zmniejszającą się aktywnością peroksydaz glebowych osłabieniu ulegał jej związek z zawartością selenu ogółem (rys. 11).

Podobnie jak w przypadku dehydrogenaz i peroksydaz, także aktywność katalazy korelowała z zawartością selenu ogółem w glebie (rys. 12). W przeciwieństwie do aktywności dehydrogenaz i peroksydaz największą aktywność tego enzymu odnotowano dopiero w drugim roku po nawożeniu obornikiem, gdy zawartość selenu w glebie była niższa. W kolejnych latach badań aktywność katalazy w glebie sukcesywnie się obniżała, niemniej jednak wykazywała nadal silny związek z zawartością selenu ogółem.



Rys. 12. Zależność między zawartością selenu ogółem a aktywnością katalazy w glebie (łącznie dla obiektów nawożonych obornikiem i azotem, średnio dla terminów pobierania próbek glebowych)

Fig. 12. Relationship between total selenium content and catalase activity in soil (total for manure and nitrogen treatments, mean for sampling date)

W porównaniu ze znaczącą siłą związków zawartości selenu ogółem w glebie z aktywnością badanych oksydoreduktaz, powiązanie zmian zawartości frakcji selenu przyswajalnego dla roślin oraz frakcji zasocjowanej z substancją organiczną gleby z aktywnością enzymatyczną okazało się trudniejsze. Część analizowanych funkcji nie wykazywała ukierunkowania. W związku z tym, ocenie poddano tylko te, dla których ukierunkowanie wariancji wyjaśnionej było największe. Zawartość selenianów(VI) (SeFI) wysoce istotnie dodatnio korelowała z aktywnością dehydrogenaz i peroksydaz wyłącznie w glebie pod uprawą ziemniaka, zgodnie z poniższymi modelami:

$$\text{SeFI (mg} \cdot \text{kg}^{-1}) = 0,001 + 0,415 \text{ DHA (mg TPF} \cdot \text{g}^{-1} \text{ s.m.} \cdot 24\text{h}^{-1}), \quad d^2 = 82,3\%$$

$$\text{SeFI (mg} \cdot \text{kg}^{-1}) = 0,008 + 0,363 \text{ PX (mg purpurogalliny} \cdot \text{g}^{-1} \text{ s.m.} \cdot \text{h}^{-1}), \quad d^2 = 84,3\%$$

W przypadku zawartości selenianów(IV) (SeFII) określono ich związek z aktywnością wszystkich badanych enzymów w pierwszym roku po zastosowaniu obornika zgodnie z następującymi równaniami:

$$\text{SeFII (mg}\cdot\text{kg}^{-1}) = -0,009 + 0,634 \text{ DHA (mg TPF}\cdot\text{g}^{-1} \text{ s.m.}\cdot\text{24h}^{-1}), \quad d^2 = 85,2\%$$

$$\text{SeFII (mg}\cdot\text{kg}^{-1}) = -0,021 + 0,554 \text{ PX (mg purpurogalliny}\cdot\text{g}^{-1} \text{ s.m.}\cdot\text{h}^{-1}), \quad d^2 = 87,0\%$$

$$\text{SeFII (mg}\cdot\text{kg}^{-1}) = -0,085 + 1,778 \text{ CAT (mg H}_2\text{O}_2\cdot\text{g}^{-1} \text{ s.m.}\cdot\text{min}^{-1}), \quad d^2 = 76,7\%$$

oraz w drugim roku po aplikacji obornika, pod uprawą pszenicy ozimej, z aktywnością dehydrogenaz i peroksydaz – zgodnie z następującymi równaniami:

$$\text{SeFII (mg}\cdot\text{kg}^{-1}) = -0,018 + 1,120 \text{ DHA (mg TPF}\cdot\text{g}^{-1} \text{ s.m.}\cdot\text{24h}^{-1}), \quad d^2 = 60,4\%$$

$$\text{SeFII (mg}\cdot\text{kg}^{-1}) = -0,016 + 0,604 \text{ PX (mg purpurogalliny}\cdot\text{g}^{-1} \text{ s.m.}\cdot\text{h}^{-1}), \quad d^2 = 75,2\%$$

Podobnie jak zawartość frakcji związanej z selenianami(IV), również frakcja selenu potencjalnie dostępna dla roślin (SeFIII), związana z amorficznymi tlenkami metali, wykazała związek z aktywnością wszystkich badanych oksydoreduktaz w glebie pod uprawą ziemniaka, zgodnie z poniższymi równaniami regresji:

$$\text{SeFIII (mg}\cdot\text{kg}^{-1}) = 0,006 + 0,481 \text{ DHA (mg}^{-1} \text{ s.m.}\cdot\text{24h}^{-1}), \quad d^2 = 81,7\%$$

$$\text{SeFIII (mg}\cdot\text{kg}^{-1}) = 0,002 + 0,403 \text{ PX (mg purpurogalliny}\cdot\text{g}^{-1} \text{ s.m.}\cdot\text{h}^{-1}), \quad d^2 = 76,9\%$$

$$\text{SeFIII (mg}\cdot\text{kg}^{-1}) = -0,047 + 1,267 \text{ CAT (mg H}_2\text{O}_2\cdot\text{g}^{-1} \text{ s.m.}\cdot\text{min}^{-1}), \quad d^2 = 65,4\%$$

Zawartość frakcji skompleksowanej z substancją organiczną (SeFIV) wykazała związek z aktywnością wszystkich badanych enzymów w glebie pod uprawą ziemniaka według poniższych równań:

$$\text{SeFIV (mg}\cdot\text{kg}^{-1}) = -0,018 + 0,105 \text{ DHA (mg TPF}\cdot\text{g}^{-1} \text{ s.m.}\cdot\text{24h}^{-1}), \quad d^2 = 74,1\%$$

$$\text{SeFIV (mg}\cdot\text{kg}^{-1}) = -0,045 + 1,018 \text{ PX (mg purpurogalliny}\cdot\text{g}^{-1} \text{ s.m.}\cdot\text{h}^{-1}), \quad d^2 = 84,3\%$$

$$\text{SeFIV (mg}\cdot\text{kg}^{-1}) = -0,166 + 3,301 \text{ CAT (mg H}_2\text{O}_2\cdot\text{g}^{-1} \text{ s.m.}\cdot\text{min}^{-1}), \quad d^2 = 76,2\%$$

W glebie pod uprawą pszenicy ozimej, w drugim roku po oborniku, zawartość frakcji zasocjowanej z substancją organiczną gleby i zależnej od aktywności badanych oksydoreduktaz opisywana jest równaniami o niższej wartości współczynnika determinacji:

$$\text{SeFIV (mg}\cdot\text{kg}^{-1}) = -0,032 + 1,545 \text{ DHA (mg TPF}\cdot\text{g}^{-1} \text{ s.m.}\cdot\text{24h}^{-1}), \quad d^2 = 32,5\%$$

$$\text{SeFIV (mg}\cdot\text{kg}^{-1}) = -0,047 + 1,023 \text{ PX (mg purpurogalliny}\cdot\text{g}^{-1} \text{ s.m.}\cdot\text{h}^{-1}), \quad d^2 = 60,8\%$$

$$\text{SeFIV (mg}\cdot\text{kg}^{-1}) = -0,099 + 1,285 \text{ CAT (mg H}_2\text{O}_2\cdot\text{g}^{-1} \text{ s.m.}\cdot\text{min}^{-1}), \quad d^2 = 61,0\%$$

Podobnie niskie wartości współczynnika determinacji charakteryzują równania zależności selenu związanego z substancją organiczną w glebie pod uprawą jęczmienia jarego, w trzecim roku po oborniku:

$$\text{SeFIV (mg}\cdot\text{kg}^{-1}) = -0,042 + 2,049 \text{ DHA (mg TPF}\cdot\text{g}^{-1} \text{ s.m.}\cdot\text{24h}^{-1}), \quad d^2 = 64,7\%$$

$$\text{SeFIV (mg}\cdot\text{kg}^{-1}) = -0,012 + 0,819 \text{ PX (mg purpurogalliny}\cdot\text{g}^{-1} \text{ s.m.}\cdot\text{h}^{-1}), \quad d^2 = 41,4\%$$

$$\text{SeFIV (mg}\cdot\text{kg}^{-1}) = -0,009 + 0,733 \text{ CAT (mg H}_2\text{O}_2\cdot\text{g}^{-1} \text{ s.m.}\cdot\text{min}^{-1}), \quad d^2 = 59,3\%$$

Uzyskane z obliczeń statystycznych wartości współczynników korelacji (tab. 27) ujawniły istotne zależności między zawartością selenu ogółem a zawartością węgla związków organicznych oraz azotu ogółem w glebie w czasie uprawy wszystkich gatunków roślin.

Tabela 27. Współczynniki korelacji dla wybranych cech
Table 27. Correlation coefficients for selected traits

Badane cechy Traits examined	Fracja glebowa Soil fraction < 0,002 mm	pH w – in H ₂ O	pH w – in 1 mol·dm ³ KCl	N _t	C _{org}
Gleba pod uprawą ziemniaka – Soil under potato					
Se ogółem – Total Se	ni-ns	0,83	0,72	0,90	0,88
SeFI	0,51	0,79	0,69	0,91	0,90
SeFII	ni-ns	0,82	0,73	0,89	0,89
SeFIII	ni-ns	0,81	0,62	0,88	0,79
SeFIV	ni-ns	0,78	0,75	0,86	0,87
DHA	-0,50	0,83	0,66	0,88	0,82
PX	-0,51	0,83	0,66	0,88	0,83
CAT	-0,62	0,71	0,62	0,74	0,75
Gleba pod uprawą pszenicy ozimej – Soil under winter wheat					
Se ogółem – Total Se	ni-ns	0,67	0,81	0,90	0,81
SeFI	ni-ns	ni-ns	ni-ns	0,60	0,55
SeFII	-0,53	0,77	0,52	0,85	0,79
SeFIII	ni-ns	0,57	ni-ns	0,47	ni-ns
SeFIV	ni-ns	0,68	0,65	0,66	0,60
DHA	ni-ns	0,66	0,64	0,84	0,81
PX	-0,47	0,80	0,65	0,86	0,84
CAT	ni-ns	0,79	0,59	0,85	0,82
Gleba pod uprawą jęczmienia jarego – Soil under spring barley					
Se ogółem – Total Se	-0,48	0,81	0,73	0,96	0,92
SeFIII	-0,57	0,63	0,68	0,79	0,80
SeFIV	-0,55	0,76	0,65	0,80	0,79
DHA	ni-ns	0,62	0,64	0,82	0,85
PX	-0,46	0,70	0,60	0,74	0,76
CAT	ni-ns	0,55	0,45	0,77	0,73
Gleba pod uprawą kukurydzy – Soil under maize					
Se ogółem – Total Se	-0,46	0,88	0,69	0,85	0,76
SeFI	ni-ns	ni-ns	ni-ns	0,50	0,60
SeFII	-0,44	0,59	0,52	0,74	0,70
SeFIII	ni-ns	0,73	0,61	0,56	ni-ns
DHA	ni-ns	0,62	ni-ns	0,69	0,60
PX	-0,52	0,77	0,49	0,79	0,73

ni-ns – różnica nieistotna – non-significant difference

W pierwszym i drugim roku po nawożeniu obornikiem nie stwierdzono zależności między zawartością selenu ogółem a zawartością frakcji iłowej, natomiast w trzecim i czwartym roku po aplikacji obornika stwierdzono istotne

ujemne korelacje między tymi cechami. Przeprowadzono również analizę korelacji zawartości selenu ogółem i kwasowości badanej gleby (tab. 27). Dla rozpatrywanych cech uzyskano wysokie współczynniki korelacji (od $r = 0,67$ do $r = 0,88$), co świadczy o tym, że w warunkach doświadczenia wraz ze wzrostem odczynu gleby zwiększała się również zawartość selenu ogółem.

Uzyskane z obliczeń statystycznych wartości współczynników korelacji wykazały istotne zależności między aktywnością badanych enzymów glebowych a zawartością węgla w związkach organicznych i azotu ogółem w glebie w prawie całym okresie badawczym, z wyjątkiem ostatniego roku (tab. 27). Analiza korelacji między aktywnością badanych oksydoreduktaz a odczynem gleby potwierdziła istotne zależności między badanymi cechami. Nie stwierdzono natomiast istotnej korelacji między aktywnością katalazy i dehydrogenaz a odczynem gleby pod uprawą kukurydzy. Przeprowadzono analizę korelacji uzyskanych wyników zawartości poszczególnych frakcji selenu w badanej glebie z zawartością węgla w związkach organicznych i zawartością azotu ogółem (tab. 27). W odniesieniu do gleby w pierwszym roku po aplikacji obornika dla rozpatrywanych zależności uzyskano wysokie wartości współczynników korelacji (od $r = 0,74$ do $r = 0,91$). Nieco niższe wartości tych współczynników dla badanych cech stwierdzono w następnym roku badań. Nie wykazano istotnej zależności między zawartością selenu związanego z tlenkami metali (SeFIII) a zawartością węgla związków organicznych. Przy uprawie jęczmienia jarego zawartość selenu związanego z tlenkami metali (SeFIII) i selenu zasocjowanego z substancją organiczną gleby (SeFIV) była istotnie skorelowana z zawartością węgla w związkach organicznych i azotu ogółem. W czwartym roku po zastosowaniu obornika, w trakcie uprawy kukurydzy, stwierdzono istotną korelację między zawartością selenianów(VI) (SeFI) oraz selenianów(IV) (SeFII) a zawartością węgla w związkach organicznych i azotu ogółem.

3.8. Zawartość selenu w roślinach

Wzrastające dawki obornika zwiększały zawartość selenu w częściach nadziemnych ziemniaka w obu badanych fazach rozwojowych tylko do poziomu $40 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ (tab. 28). Wzrost ten został udowodniony statystycznie. Wyższe dawki nawozu organicznego zawartość tę obniżały. Podobne wyniki uzyskano określając zawartość selenu w bulwach w fazie BBCH 97. Zawartość tego pierwiastka w bulwach w fazie BBCH 65 kształtowała się na poziomie średnio od $0,066$ do $0,120 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. i wzrastała systematycznie wraz ze zwiększeniem dawki obornika, przy czym wzrost ten był statystycznie istotny już od $20 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$. Wzrastające dawki azotu na ogół powodowały istotny wzrost zawartości selenu w częściach nadziemnych ziemniaka w obu fazach fenologicznych (tab. 28). Również w bulwach w fazie BBCH 65 stwierdzono wzrost zawartości tego mikroelementu pod wpływem nawożenia azotem. Odwrotną tendencję wykazano w odniesieniu do bulw tej rośliny w fazie BBCH 97; nawożenie wysokimi dawkami azotu spowodowało udowodnione statystycznie obniżenie w nich zawartości selenu.

Tabela 28. Zawartość selenu w ziemniaku ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m.)
 Table 28. Selenium content in potato ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ d.m.)

Dawka obornika (czynnik A) Dose of manure (factor A) ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Dawka N (czynnik B) Dose of N (factor B) ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Faza fenologiczna – Phenological phase			
		BBCH 65		BBCH 97	
		części nadziemne above-ground parts	bulwy tubers	części nadziemne above-ground parts	bulwy tubers
0	0	0,060	0,069	0,049	0,052
	45	0,060	0,066	0,042	0,059
	90	0,057	0,066	0,048	0,056
	135	0,058	0,064	0,045	0,058
Średnia – Mean		0,059	0,066	0,046	0,056
20	0	0,056	0,086	0,042	0,090
	45	0,066	0,080	0,062	0,091
	90	0,068	0,093	0,054	0,075
	135	0,070	0,112	0,052	0,105
Średnia – Mean		0,065	0,093	0,053	0,090
40	0	0,068	0,094	0,060	0,124
	45	0,069	0,096	0,070	0,085
	90	0,063	0,140	0,050	0,065
	135	0,065	0,108	0,053	0,038
Średnia – Mean		0,066	0,110	0,058	0,078
60	0	0,055	0,126	0,044	0,031
	45	0,065	0,106	0,046	0,047
	90	0,054	0,105	0,046	0,040
	135	0,068	0,120	0,058	0,040
Średnia – Mean		0,061	0,114	0,049	0,040
80	0	0,063	0,119	0,051	0,040
	45	0,060	0,122	0,050	0,054
	90	0,060	0,117	0,052	0,037
	135	0,063	0,120	0,056	0,040
Średnia – Mean		0,062	0,120	0,052	0,043
Średnia dla dawki N Mean for N dose	0	0,060	0,099	0,049	0,067
	45	0,064	0,094	0,054	0,067
	90	0,060	0,104	0,050	0,055
	135	0,065	0,105	0,053	0,056
Średnia – Mean		0,063	0,101	0,052	0,061
NIR – LSD	A	0,004	0,011	0,003	0,007
	B	0,004	0,008	0,002	0,006
	B/A	0,007	0,014	0,007	0,013
	A/B	0,007	0,014	0,007	0,014

Tabela 29. Zawartość selenu w pszenicy ozimej ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m.)
 Table 29. Selenium content in winter wheat ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ d.m.)

Dawka obornika (czynnik A) Dose of manure (factor A) ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Dawka N (czynnik B) Dose of N (factor B) ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Faza fenologiczna – Phenological phase			
		BBCH 25		BBCH 87	
		części nadziemne above-ground parts	korzenie roots	części nadziemne above-ground parts	korzenie roots
0	0	0,151	0,108	0,081	0,109
	40	0,164	0,102	0,081	0,117
	80	0,165	0,064	0,084	0,150
	120	0,159	0,091	0,083	0,105
Średnia – Mean		0,160	0,091	0,082	0,120
20	0	0,177	0,103	0,097	0,122
	40	0,377	0,336	0,097	0,237
	80	0,300	0,256	0,095	0,243
	120	0,489	0,244	0,130	0,292
Średnia – Mean		0,335	0,235	0,105	0,224
40	0	0,502	0,284	0,176	0,260
	40	0,462	0,249	0,175	0,327
	80	0,279	0,436	0,173	0,294
	120	0,283	0,414	0,140	0,292
Średnia – Mean		0,382	0,340	0,166	0,293
60	0	0,348	0,390	0,130	0,374
	40	0,442	0,443	0,123	0,282
	80	0,326	0,391	0,131	0,351
	120	0,377	0,264	0,146	0,431
Średnia – Mean		0,373	0,372	0,133	0,360
80	0	0,173	0,409	0,109	0,176
	40	0,165	0,452	0,125	0,188
	80	0,178	0,464	0,089	0,177
	120	0,174	0,456	0,096	0,161
Średnia – Mean		0,173	0,445	0,105	0,178
Średnia dla dawki N Mean for N dose	0	0,270	0,259	0,119	0,208
	40	0,322	0,316	0,120	0,230
	80	0,250	0,322	0,114	0,243
	120	0,296	0,294	0,119	0,256
Średnia – Mean		0,285	0,298	0,118	0,234
NIR – LSD	A	0,027	0,046	0,011	0,037
	B	0,014	0,046	ni-ns	0,018
	B/A	0,046	0,088	0,025	0,051
	A/B	0,049	0,094	0,027	0,054

ni-ns – różnica nieistotna – non-significant difference

Dane zamieszczone w tabeli 29 wskazują na to, że zawartość selenu w częściach nadziemnych pszenicy w obu fazach rozwojowych wzrastała wraz ze

zwiększeniem nawożenia obornikiem do wysokości $40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Rośliny na tych obiektach zgromadziły w częściach nadziemnych ponad 2-krotnie więcej selenu niż nie nawożone tym nawozem. Jego zawartość istotnie obniżyło dalsze zwiększanie dawek nawozu naturalnego. W przypadku korzeni pszenicy zawartość selenu zwiększała się wraz ze wzrostem dawki obornika. Obniżenie jego zawartości wykazano jedynie w korzeniach roślin w fazie BBCH 87 na obiekcie, na którym stosowano największą dawkę nawozu. Zawartość selenu w badanych częściach pszenicy ozimej istotnie zależała od nawożenia azotem, z wyjątkiem części nadziemnych w fazie BBCH 87. Nawożenie azotem zwiększało na ogół koncentrację tego pierwiastka w pszenicy we wcześniejszej fazie rozwojowej, chociaż w przypadku części nadziemnych nie wykazano wyraźnie ukierunkowanego wpływu azotu w tym zakresie. W korzeniach roślin wykazano natomiast istotny wzrost zawartości selenu na obiektach, na których stosowano 40 i $80 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ azotu. W korzeniach pszenicy w fazie BBCH 87 zawartość selenu istotnie zwiększała się wraz ze wzrostem dawki tego składnika.

Zawartość selenu w częściach nadziemnych jęczmienia, w fazie BBCH 30, kształtowała się na poziomie średnio od 0,145 do $0,267 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m. (tab. 30). Analiza statystyczna wykazała istotny wpływ nawożenia obornikiem na koncentrację tego pierwiastka w częściach nadziemnych – najwięcej zgromadziły go rośliny z obiektów, na których obornik stosowano w dawce $40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. W podobny sposób nawożenie obornikiem wpływało na kumulację selenu w korzeniach jęczmienia, jednak zawartość tego pierwiastka istotnie wzrastała do dawki $60 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Dalsze zwiększenie dawki spowodowało obniżenie jego zawartości. Nawożenie obornikiem w istotny sposób wpływało również na gromadzenie selenu w częściach nadziemnych jęczmienia w fazie BBCH 87. Największy wpływ w tym zakresie wykazano po zastosowaniu 40 i $60 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ obornika. W korzeniach jęczmienia w fazie BBCH 87 każda z dawek obornika zwiększyła w istotny sposób zawartość selenu, przy czym najkorzystniejszą z nich była dawka $40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, gdyż po jej zastosowaniu zawartość selenu wzrosła o ponad 70%. Nawożenie azotem na ogół zwiększyło nagromadzenie selenu w roślinach jęczmienia, z wyjątkiem części nadziemnych w fazie BBCH 87.

Dane przedstawione w tabeli 31 wskazują, że na ogół więcej selenu zgromadziły korzenie kukurydzy, w których średnia zawartość wynosiła od 0,121 do $0,292 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m., natomiast niższą, nie przekraczającą średnio $0,236 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m. ilość oznaczono w częściach nadziemnych tej rośliny. Stosowany obornik w istotny sposób wpływał na ogół na kształtowanie się zawartości selenu w badanych częściach roślin. W przypadku kukurydzy w fazie BBCH 15 największy wpływ w tym zakresie wykazano po zastosowaniu 20 i $40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ obornika. Na tych obiektach stwierdzono średnio o ponad 70% wyższą zawartość selenu w częściach nadziemnych i ponad 2-krotnie wyższą w korzeniach kukurydzy w porównaniu z obiektami, na których obornika nie stosowano.

Tabela 30. Zawartość selenu w jęczmieniu jarym ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m.)
 Table 30. Selenium content in spring barley ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ d.m.)

Dawka obornika (czynnik A) Dose of manure (factor A) ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Dawka N (czynnik B) Dose of N (factor B) ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Faza fenologiczna – Phenological phase			
		BBCH 30		BBCH 87	
		części nadziemne above-ground parts	korzenie roots	części nadziemne above-ground parts	korzenie roots
0	0	0,152	0,189	0,068	0,151
	40	0,154	0,185	0,076	0,171
	80	0,140	0,197	0,089	0,161
	120	0,148	0,161	0,078	0,186
Średnia – Mean		0,145	0,183	0,078	0,167
20	0	0,155	0,217	0,087	0,229
	40	0,270	0,194	0,109	0,259
	80	0,228	0,183	0,115	0,242
	120	0,218	0,184	0,114	0,220
Średnia – Mean		0,218	0,195	0,106	0,238
40	0	0,196	0,229	0,146	0,295
	40	0,348	0,219	0,128	0,307
	80	0,282	0,242	0,137	0,296
	120	0,242	0,247	0,136	0,259
Średnia – Mean		0,267	0,234	0,137	0,289
60	0	0,282	0,250	0,141	0,239
	40	0,294	0,281	0,136	0,269
	80	0,163	0,282	0,134	0,265
	120	0,145	0,250	0,141	0,233
Średnia – Mean		0,221	0,266	0,138	0,252
80	0	0,154	0,261	0,086	0,221
	40	0,160	0,220	0,092	0,255
	80	0,169	0,272	0,086	0,229
	120	0,212	0,289	0,065	0,234
Średnia – Mean		0,174	0,261	0,082	0,227
Średnia dla dawki N Mean for N dose	0	0,188	0,229	0,106	0,227
	40	0,245	0,220	0,108	0,252
	80	0,196	0,235	0,112	0,239
	120	0,193	0,226	0,107	0,226
Średnia – Mean		0,205	0,228	0,108	0,235
NIR – LSD	A	0,019	0,008	0,011	0,015
	B	0,015	0,005	ni-ns	0,013
	B/A	0,025	0,008	0,022	0,023
	A/B	0,026	0,009	0,024	0,025

ni-ns – różnica nieistotna – non-significant difference

Tabela 31. Zawartość selenu w kukurydzy ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m.)
 Table 31. Selenium content in maize ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ d.m.)

Dawka obornika (czynnik A) Dose of manure (factor A) ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Dawka N (czynnik B) Dose of N (factor B) ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Faza fenologiczna – Phenological phase			
		BBCH 15		BBCH 85	
		części nadziemne above-ground parts	korzenie roots	części nadziemne above-ground parts	korzenie roots
0	0	0,120	0,122	0,115	0,111
	45	0,124	0,112	0,133	0,126
	90	0,128	0,133	0,133	0,124
	135	0,124	0,132	0,096	0,124
Średnia – Mean		0,126	0,125	0,119	0,121
20	0	0,175	0,177	0,125	0,155
	45	0,209	0,377	0,123	0,158
	90	0,254	0,295	0,123	0,245
	135	0,308	0,239	0,116	0,159
Średnia – Mean		0,236	0,272	0,122	0,179
40	0	0,201	0,322	0,162	0,182
	45	0,317	0,407	0,161	0,186
	90	0,121	0,223	0,150	0,193
	135	0,151	0,214	0,127	0,195
Średnia – Mean		0,197	0,292	0,150	0,189
60	0	0,144	0,145	0,163	0,133
	45	0,138	0,134	0,134	0,130
	90	0,167	0,151	0,119	0,103
	135	0,167	0,194	0,154	0,142
Średnia – Mean		0,154	0,156	0,143	0,135
80	0	0,188	0,183	0,134	0,124
	45	0,164	0,217	0,154	0,122
	90	0,158	0,221	0,114	0,156
	135	0,209	0,198	0,133	0,126
Średnia – Mean		0,180	0,205	0,134	0,132
Średnia dla dawki N Mean for N dose	0	0,166	0,190	0,140	0,141
	45	0,190	0,249	0,141	0,144
	90	0,166	0,205	0,128	0,164
	135	0,192	0,195	0,125	0,149
Średnia – Mean		0,179	0,210	0,134	0,151
NIR–LSD	A	0,037	0,011	0,023	0,014
	B	0,036	0,008	ni-ns	0,020
	B/A	0,059	0,014	ni-ns	ni-ns
	A/B	0,063	0,014	ni-ns	ni-ns

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

W podobny sposób nawożenie obornikiem wpływało na koncentrację selenu w badanych częściach roślin w fazie BBCH 85. Najwyższą zawartość tego pierwiastka stwierdzono na obiektach nawożonych $40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ obornika, a dalsze zwiększenie dawek tego nawozu spowodowało istotne obniżenie zawartości selenu. Nawożenie azotem zwiększało zawartość selenu w badanych częściach kukurydzy w fazie BBCH 15. W częściach nadziemnych istotny wzrost zawartości tego pierwiastka stwierdzono na obiektach, na których zastosowano największą dawkę azotu. Korzenie roślin zgromadziły natomiast najwięcej selenu po aplikacji $80 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$. Nawożenie azotem nie miało wpływu na gromadzenie selenu w częściach nadziemnych kukurydzy w fazie BBCH 85, gdyż jego zawartość utrzymywała się na zbliżonym poziomie. Największą kumulację selenu w korzeniach kukurydzy w fazie BBCH 85 wykazano na obiektach nawożonych azotem na poziomie $40 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, a dalsze zwiększenie dawek azotu istotnie obniżyło koncentrację tego pierwiastka.

3.9. Współczynniki bioakumulacji (BC) i translokacji (TC) selenu dla badanych gatunków roślin

Wartość współczynnika bioakumulacji (BC) określa zdolność roślin do pobierania składników pokarmowych zawartych w glebie. Parametr ten jest ilorazem zawartości pierwiastka w roślinie do jego zawartości w glebie. Zastosowany w doświadczeniach własnych obornik w podobny sposób wpływał na przemieszczanie się selenu z roztworu glebowego do części nadziemnych oraz bulw ziemniaka w obu fazach rozwojowych roślin (tab. 32). Jego mobilność obniżała się wraz ze wzrostem dawki obornika. Przemieszczanie się selenu z gleby do części nadziemnych pszenicy ozimej w fazie BBCH 25 było najwyższe wówczas, gdy obornik stosowano w dawkach 20 i $40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. W fazie BBCH 87 selen natomiast najłatwiej przemieszczał się z gleby do części nadziemnych na obiektach, na których zastosowano nawożenie obornikiem na poziomie 40 i $60 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Współczynniki bioakumulacji selenu dla korzeni pszenicy wskazują, że w fazie BBCH 25 selen łatwiej przemieszczał się z gleby wraz ze zwiększaniem nawożenia obornikiem, podczas gdy u roślin w fazie BBCH 87 wykazano tendencję odwrotną.

Mobilność selenu z gleby do części nadziemnych jęczmienia jarego w fazie BBCH 30 była najwyższa na obiektach, gdzie obornik stosowano w dawkach 20 i $40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. W przypadku korzeni jęczmienia w fazie BBCH 30, zwiększanie dawek obornika spowodowało mniejszą mobilność tego pierwiastka z gleby. Współczynniki BC dla części nadziemnych i korzeni jęczmienia w fazie BBCH 87 wskazują, że selen najłatwiej przemieszczał się z gleby na obiektach nawiezionych 20 i $40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ obornika, a dalsze zwiększanie dawek nawozu obniżyło jego mobilność. Stosowany obornik w podobny sposób wpływał na przemieszczanie się selenu z gleby do badanych części kukurydzy. Zaobserwowano tendencję do obniżenia jego mobilności wraz ze zwiększaniem ilości obornika wprowadzonego do gleby.

Tabela 32. Współczynniki bioakumulacji (BC) selenu dla badanych gatunków roślin w poszczególnych fazach fenologicznych (średnio dla dawek azotu)

Table 32. Bioaccumulation coefficients (BC) of selenium for the plant species investigated at particular phenological phases (mean for nitrogen doses)

Współczynnik bioakumulacji selenu dla roślin ziemniaka Bioaccumulation coefficient of selenium for potato plants				
Dawka obornika Dose of manure (t·ha ⁻¹)	BBCH 65		BBCH 97	
	części nadziemne above-ground parts	bulwy tubers	części nadziemne above-ground parts	bulwy tubers
0	0,63	0,78	0,46	0,60
20	0,44	0,66	0,43	0,61
40	0,35	0,63	0,33	0,42
60	0,29	0,51	0,24	0,19
80	0,23	0,42	0,19	0,16
Współczynnik bioakumulacji selenu dla roślin pszenicy ozimej Bioaccumulation coefficient of selenium for winter wheat plants				
Dawka obornika Dose of manure (t·ha ⁻¹)	BBCH 25		BBCH 87	
	części nadziemne above-ground parts	korzenie roots	części nadziemne above-ground parts	korzenie roots
0	1,54	0,92	0,82	1,20
20	2,50	1,38	0,64	1,37
40	2,18	1,85	1,00	1,77
60	1,92	1,97	0,71	1,93
80	0,73	2,28	0,51	0,86
Współczynnik bioakumulacji selenu dla roślin jęczmienia jarego Bioaccumulation coefficient of selenium for spring barley plants				
Dawka obornika Dose of manure (t·ha ⁻¹)	BBCH 30		BBCH 87	
	części nadziemne above-ground parts	korzenie roots	części nadziemne above-ground parts	korzenie roots
0	1,81	2,29	1,01	2,17
20	2,25	2,01	1,24	2,80
40	2,36	2,07	1,23	2,60
60	1,64	1,97	1,11	2,03
80	1,14	1,71	0,63	1,75
Współczynnik bioakumulacji selenu dla roślin kukurydzy Bioaccumulation coefficient of selenium for maize plants				
Dawka obornika Dose of manure (t·ha ⁻¹)	BBCH 15		BBCH 85	
	części nadziemne above-ground parts	korzenie roots	części nadziemne above-ground parts	korzenie roots
0	1,37	1,99	1,49	2,09
20	1,74	1,43	1,44	1,92
40	1,40	1,66	1,36	2,08
60	1,08	1,86	0,97	1,81
80	1,09	1,58	0,94	1,62

Współczynnik translokacji (TC) przedstawiony jako iloraz zawartości selenu w częściach nadziemnych roślin do jego zawartości w korzeniach określa mobilność tego pierwiastka w roślinach. W przypadku ziemniaka zawartość selenu badano tylko w częściach nadziemnych i bulwach, dlatego nie było podstaw do obliczenia współczynników translokacji. W pszenicy ozimej, w fazie BBCH 25, przemieszczanie tego pierwiastka z korzeni do części nadziemnych obniżało się wraz ze zwiększaniem nawożenia obornikiem (tab. 33).

Tabela 33. Współczynniki translokacji (TC) selenu dla badanych gatunków roślin w poszczególnych fazach fenologicznych (średnio dla dawek azotu)

Table 33. Translocation coefficients (TC) of selenium for the plants species investigated at particular phenological phases (mean for nitrogen doses)

Współczynniki translokacji selenu dla roślin pszenicy ozimej Translocation coefficients of selenium for winter wheat plants		
Dawka obornika Dose of manure (t·ha ⁻¹)	BBCH 25	BBCH 87
0	1,76	0,68
20	1,43	0,47
40	1,12	0,57
60	1,00	0,37
80	0,39	0,59
Współczynniki translokacji selenu dla roślin jęczmienia jarego Translocation coefficients of selenium for spring barley plants		
Dawka obornika Dose of manure (t·ha ⁻¹)	BBCH 30	BBCH 87
0	0,79	0,47
20	1,12	0,45
40	1,14	0,47
60	0,83	0,55
80	0,67	0,36
Współczynniki translokacji selenu dla roślin kukurydzy Translocation coefficients of selenium for maize plants		
Dawka obornika Dose of manure (t·ha ⁻¹)	BBCH 15	BBCH 85
0	1,01	0,98
20	0,87	0,68
40	0,67	0,79
60	0,99	1,06
80	0,88	1,02

Podobnie u roślin w fazie BBCH 87 selen był najłatwiej transportowany z korzeni do części nadziemnych, gdy obornika nie stosowano. Współczynniki translokacji selenu w jęczmieniu jarym w fazie BBCH 30 (tab. 33) świadczą

o tym, że zastosowanie 20 i 40 t·ha⁻¹ obornika sprzyja przemieszczaniu selenu z korzeni do części nadziemnych roślin. Natomiast w roślinach w fazie BBCH 87 pierwiastek ten był najmniej mobilny na obiekcie, na którym stosowano największą dawkę nawozu. Transport selenu z korzeni do części nadziemnych kukurydzy zachodził podobnie w obu fazach rozwojowych, niezależnie od dawki obornika. Zauważono jednak niewielkie obniżenie współczynnika TC w roślinach, gdy obornik stosowano w dawkach 20 i 40 t·ha⁻¹.

3.10. Zawartość selenu w częściach konsumpcyjnych badanych gatunków roślin

Wśród części konsumpcyjnych badanych roślin doświadczalnych najwięcej selenu stwierdzono w ziarnie pszenicy (średnio od 0,173 do 0,391 mg·kg⁻¹ s.m.), a najmniej w bulwach ziemniaka, w których zawartość średnia nie przekraczała 0,090 mg·kg⁻¹ s.m. (tab. 34).

Stosowany obornik w zróżnicowany sposób wpływał na kształtowanie się zawartości selenu w częściach konsumpcyjnych badanych roślin. W przypadku bulw ziemniaka zawartość tego pierwiastka wzrastała wraz ze zwiększaniem się nawożenia obornikiem, ale tylko do dawki 40 t·ha⁻¹. Dalsze zwiększanie dawek istotnie obniżyło koncentrację tego pierwiastka, która przyjmowała wartości nawet niższe niż na obiekcie kontrolnym. Podobną tendencję wykazano u kukurydzy, przy czym obniżenie zawartości selenu przy wyższych dawkach obornika nie było już tak znaczne, chociaż statystycznie istotne. Nawożenie obornikiem w podobny sposób wpływało na kształtowanie się zawartości selenu u pszenicy ozimej i jęczmienia jarego, gdyż wykazano, że aż do dawki 60 t·ha⁻¹ obornika istotnie wzrastała zawartość tego pierwiastka w ziarnie obu gatunków. Obniżenie jego zawartości stwierdzono jedynie po zastosowaniu najwyższej dawki obornika. Nawożenie azotem w przypadku bulw ziemniaka, ziarna pszenicy i jęczmienia zmniejszało zawartość selenu, nie miało natomiast wpływu na gromadzenie tego pierwiastka w ziarnie kukurydzy, w którym jego zawartość utrzymywała się na zbliżonym poziomie.

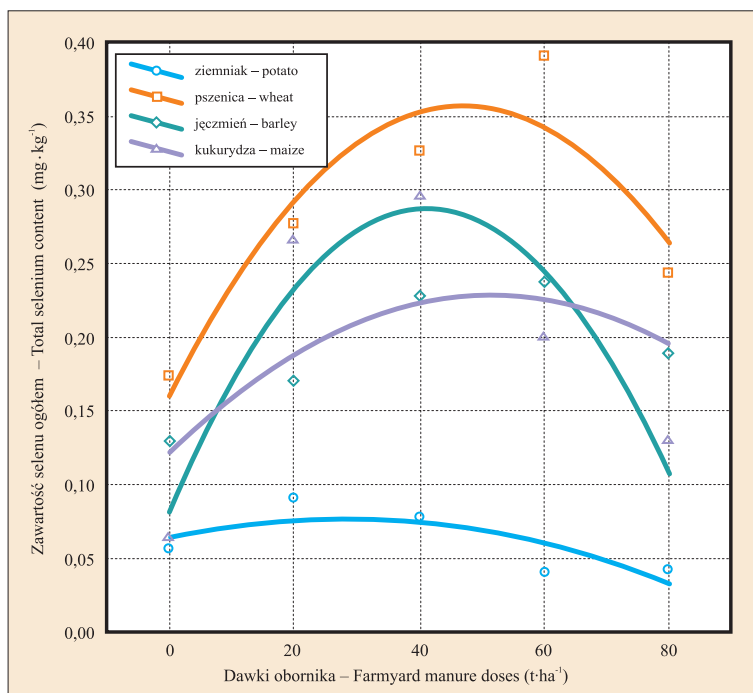
W celu zobrazowania tendencji zmian zawartości selenu w częściach konsumpcyjnych roślin w zmianowaniu, wywołanych zastosowanym nawożeniem obornikiem, przeprowadzono analizę regresji (rys. 13). Zależności te układały się krzywoliniowo według następujących funkcji kwadratowych:

- w bulwach ziemniaka $y = 0,064 + 0,001x - 0,00002x^2$ $r = 0,768$
- w ziarnie pszenicy ozimej $y = 0,161 + 0,008x - 0,0001x^2$ $r = 0,929$
- w ziarnie jęczmienia jarego $y = 0,122 + 0,004x - 0,00004x^2$ $r = 0,958$
- w ziarnie kukurydzy $y = 0,082 + 0,010x - 0,0001x^2$ $r = 0,943$

Analiza korelacji uzyskanych wyników zawartości selenu w częściach konsumpcyjnych badanych gatunków roślin zbożowych z zawartością selenu ogółem w glebie wykazała istotne zależności między tymi parametrami (od $r = 0,45$ do $r = 0,61$) (tab. 35).

Tabela 34. Zawartość selenu w częściach konsumpcyjnych badanych gatunków roślin (mg·kg⁻¹ s.m.)Table 34. Selenium content in edible parts of the investigated plants species (mg·kg⁻¹ d.m.)

Dawka obornika (czynnik A) Dose of manure (factor A) (t·ha ⁻¹)	Dawka N (czynnik B) Dose of N (factor B) (kg·ha ⁻¹)	Bulwy ziemniaka Potato tubers	Ziarno pszenicy Wheat grain	Ziarno jęczmienia Barley grain	Ziarno kukurydzy Maize grain
0	N0	0,052	0,173	0,136	0,061
	N1	0,059	0,181	0,136	0,064
	N2	0,056	0,152	0,110	0,061
	N3	0,058	0,184	0,137	0,071
Średnia – Mean		0,056	0,173	0,130	0,064
20	N0	0,090	0,256	0,185	0,170
	N1	0,091	0,243	0,159	0,284
	N2	0,075	0,353	0,179	0,302
	N3	0,105	0,255	0,155	0,308
Średnia – Mean		0,090	0,277	0,170	0,266
40	N0	0,124	0,427	0,266	0,275
	N1	0,085	0,392	0,248	0,342
	N2	0,065	0,296	0,228	0,280
	N3	0,038	0,192	0,169	0,288
Średnia – Mean		0,078	0,327	0,228	0,296
60	N0	0,031	0,439	0,251	0,215
	N1	0,047	0,407	0,238	0,195
	N2	0,040	0,391	0,235	0,194
	N3	0,040	0,327	0,228	0,197
Średnia – Mean		0,040	0,391	0,238	0,200
80	N0	0,040	0,266	0,198	0,169
	N1	0,054	0,243	0,187	0,148
	N2	0,037	0,240	0,185	0,112
	N3	0,040	0,224	0,185	0,085
Średnia – Mean		0,043	0,243	0,189	0,129
Średnia dla dawki N Mean for N dose	N0	0,067	0,312	0,207	0,178
	N1	0,067	0,293	0,194	0,207
	N2	0,055	0,286	0,187	0,190
	N3	0,056	0,236	0,175	0,190
Średnia – Mean		0,061	0,282	0,191	0,191
NIR – LSD	A	0,007	0,042	0,029	0,018
	B	0,006	0,024	0,020	0,019
	B/A	0,013	0,070	0,038	0,052
	A/B	0,014	0,074	0,041	0,056



Rys. 13. Zawartość selenu w częściach konsumpcyjnych badanych gatunków roślin w zależności od nawożenia obornikiem (średnio dla dawek azotu)

Fig. 13. Selenium content in edible parts of the investigated plants species depending on manure fertilization (mean for nitrogen doses)

Nie stwierdzono istotnej korelacji między zawartością selenu w bulwach ziemniaka w fazie BBCH 97 a zawartością selenu ogółem w glebie. W odniesieniu do bulw ziemniaka w fazie BBCH 65 oraz korzeni pszenicy ozimej zbieranych w fazie BBCH 25 wykazano natomiast wysoce istotne zależności między zawartością selenu a zawartością selenu ogółem, zawartością selenianów(VI) (SeFI), selenianów(IV) (SeFII) oraz aktywnością badanych oksydoreduktaz w glebie.

Wysoko istotne korelacje stwierdzono także między zawartością selenu w częściach nadziemnych i korzeniach pszenicy ozimej w fazie BBCH 87 a zawartością selenu ogółem, zawartością selenianów(VI) (SeFI) i selenianów(IV) (SeFII) w glebie. Nagromadzenie selenu w korzeniach jęczmienia jarego w fazie BBCH 30 zależało natomiast istotnie od aktywności badanych oksydoreduktaz glebowych. W trakcie zmianowania, w trzecim i czwartym roku po aplikacji obornika, w miarę wyczerpywania się zapasów selenu w glebie, związki między zawartością tego pierwiastka w glebie i roślinach były wyraźnie słabsze (tab. 35).

Tabela 35. Współczynniki korelacji dla wybranych cech
Table 35. Correlation coefficients for selected traits

Badane cechy – Traits examined	Se _{og}	SeFI	SeFII	DHA	PX	CAT
Se w bulwach ziemniaka w fazie BBCH 65 Se in potato tubers at phase BBCH 65	0,80	0,81	0,78	0,79	0,82	0,60
Se w częściach nadziemnych pszenicy ozimej w fazie BBCH 25 Se in above-ground parts of winter wheat at phase BBCH 25	ni-ns	0,47	ni-ns	ni-ns	ni-ns	ni-ns
Se w korzeniach pszenicy ozimej w fazie BBCH 25 Se in roots of winter wheat at phase BBCH 25	0,89	0,58	0,82	0,79	0,86	0,73
Se w częściach nadziemnych pszenicy ozimej w fazie BBCH 87 Se in above-ground parts of winter wheat at phase BBCH 87	0,45	0,54	0,48	ni-ns	ni-ns	ni-ns
Se w korzeniach pszenicy ozimej w fazie BBCH 87 Se in roots of winter wheat at phase BBCH 87	0,50	0,70	0,61	0,52	ni-ns	ni-ns
Se w ziarnie pszenicy ozimej Se in winter wheat grain	0,48	0,55	0,52	0,48	ni-ns	ni-ns
Se w korzeniach jęczmienia jarego w fazie BBCH 30 Se in roots of spring barley at phase BBCH 30	0,82	ni-ns	ni-ns	0,73	0,49	0,48
Se w częściach nadziemnych jęczmienia jarego w fazie BBCH 87 Se in above-ground parts of spring barley at phase BBCH 87	ni-ns	-0,49	ni-ns	ni-ns	ni-ns	ni-ns
Se w korzeniach jęczmienia jarego w fazie BBCH 87 Se in roots of spring barley at phase BBCH 87	0,56	-0,55	-0,46	ni-ns	ni-ns	ni-ns
Se w ziarnie jęczmienia jarego Se in spring barley grain	0,61	ni-ns	ni-ns	ni-ns	ni-ns	0,67
Se w częściach nadziemnych kukurydzy w fazie BBCH 85 Se in above-ground parts of maize at phase BBCH 85	0,47	ni-ns	ni-ns	ni-ns	ni-ns	ni-ns
Se w korzeniach kukurydzy w fazie BBCH 85 Se in roots of maize at phase BBCH 85	ni-ns	-0,55	ni-ns	ni-ns	ni-ns	ni-ns
Se w ziarnie kukurydzy Se in maize grain	0,45	ni-ns	ni-ns	ni-ns	ni-ns	ni-ns

ni-ns – różnica nieistotna – non-significant difference

4. DYSKUSJA

Naturalna zawartość pierwiastków chemicznych w glebie zależy głównie od pochodzenia geologicznego i składu mineralogicznego skały macierzystej oraz od procesów wietrzenia i glebotwórczych oraz składu granulometrycznego [Cieśla i in. 1994, Kabata-Pendias i Pendias 1999, Raczuk i Tkaczuk 2003]. Z dotychczasowych badań dotyczących zasobności polskich gleb w selen wynika, że są one, podobnie jak większość gleb Europy, ubogie w ten pierwiastek [Kabata-Pendias i Pendias 1999, Opinion of the Scientific Committee 2000]. Należy jednak podkreślić, że ocena zasobności gleb Polski w selen dokonywana była jak do tej pory w sposób fragmentaryczny. Dudka [1992] charakteryzował obszar całej Polski pod względem zawartości ponad dwudziestu pierwiastków śladowych, w tym również selenu, którego zawartość kształtowała się w zakresie 0,070-0,410 mg·kg⁻¹. W jego badaniach największy udział stanowiły jednak gleby piaszczyste, a mniejszy gleby wytworzone z utworów pyłowych i gliniastych. Z badań Piotrowskiej [1984] wynika, że zawartość selenu ogółem w glebie była wyraźnie uzależniona od zawartości części spławialnych. Najmniej selenu (0,04-0,10 mg·kg⁻¹) stwierdzono w glebach powstałych z piasków luźnych i słabo gliniastych, natomiast gleby wytworzone z piasków gliniastych lekkich i mocnych okazały się bardziej zasobne w ten pierwiastek, którego średnia zawartość wynosiła 0,30 mg·kg⁻¹. Gleby okolic Szczecina, badane przez Zabłockiego [1990], charakteryzowały się również bardzo niską zasobnością w selen całkowity (0,026-0,293 mg·kg⁻¹), podobnie jak gleby płowe z obszaru Kujaw i Pomorza, w których zawartość selenu ogółem nie przekraczała 0,15 mg·kg⁻¹ [Borowska i in. 1994, 2003, 2004, Cieśla i in. 1994]. Kabata-Pendias i Pendias [1999] podają, że średnia zawartość selenu w powierzchniowych poziomach gleb uprawnych świata wynosi 0,33 mg·kg⁻¹, a zakres najczęstszych wartości średnich mieści się w przedziale 0,2-0,6 mg·kg⁻¹. Gleby fińskie na ogół uznawane są za deficytowe pod względem zasobności w selen, bowiem jego poziom 0,2-0,3 mg·kg⁻¹ uważany jest za niski [Aro i Alfthang 1998].

W badaniach własnych, w glebie, na której obornika nie stosowano, zawartości selenu ogółem w okresie badawczym kształtowały się, średnio dla dawek azotu, na poziomie 0,072-0,110 mg·kg⁻¹. Uzyskane wyniki wykazały, że zawartość selenu ogółem w badanej glebie, w określonych warunkach nawożenia, była znacznie niższa od średniej światowej. Wskazuje to na silne rozproszenie selenu, co może wiązać się z wykształceniem gleb Polski przeważnie z materiałów zwałowych różnych złodowaceń, w tym wielu silnie posortowanych i wyługowanych z tego pierwiastka [Zabłocki 1990, Cieśla i in. 1994]. W warunkach prowadzonych badań wykazano, że nawożenie obornikiem w całym okresie badawczym istotnie wpływało na koncentrację selenu ogółem w glebie, która wzrastała wraz z jego dawką. Niezależnie od terminu pobierania próbek glebowych zastosowanie najwyższej dawki obornika spowodowało istotne – ponad 3-krotne zwiększenie zawartości selenu ogółem w glebie, na której uprawiano

ziemniaki, natomiast pod pozostałymi roślinami w zmianowaniu blisko 2-krotny jego wzrost. Niewątpliwie zwiększenie zawartości tego pierwiastka w glebie spowodowane było dodatkiem obornika, w którym średnia zawartość selenu ogółem wynosiła $2,28 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m. Nieco wyższą zawartość tego pierwiastka w oborniku, na poziomie $2,4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m., stwierdzili Maćkowiak [1994] i Sager [1999, 2007]. Z wcześniejszych prac badawczych [Blagojević i in. 1998, Borowska i Koper 2000, 2001], prowadzonych w warunkach wieloletnich doświadczeń polowych, dotyczących wpływu nawożenia organicznego na zawartość selenu w glebie, wynika, że wzrastające nawożenie obornikiem i gnojowicą spowodowało wyraźny wzrost zarówno zawartości selenu ogółem, jak i przyswajalnego dla roślin. Znajduje to potwierdzenie w publikacjach wielu autorów, którzy wykazali zależności między zawartością selenu w glebie a zawartością materii organicznej oraz tlenków żelaza [Hamdy i Gissel-Nielsen 1970, Lévesque 1977, Piotrowska 1984, Bar-Yosef i Meek 1987, Wu i Låg 1988, Zabłocki 1990].

W badaniach własnych nawożenie azotem wpływało na zawartość selenu ogółem w glebie w sposób niejednoznaczny. Na ogół na początku okresu wegetacyjnego nie stwierdzono istotnego wpływu nawożenia azotem na kształtowanie się zawartości selenu ogółem w glebie lub wpływ tego składnika, chociaż istotny statystycznie, nie był wyraźnie ukierunkowany. W odniesieniu natomiast do gleby, na której uprawiano jęczmień jary i kukurydzę, w pełni i pod koniec wegetacji roślin wykazano, że nawożenie azotem istotnie zwiększyło zawartość tego pierwiastka. Gissel-Nielsen i in. [1984], badając wpływ azotu, fosforu i siarki na pobieranie selenu z gleby, zaobserwowali wzajemne relacje pomiędzy tymi trzema anionami dodanymi w nawozach a pobieraniem selenu przez rośliny. Według tych autorów, dodatek azotu i siarki obniżał do pewnego stopnia zawartość selenu w glebie. Przy wysokim poziomie nawożenia azotem i siarką dodatek nawozów fosforowych również spowodował obniżenie zawartości selenu w glebie, natomiast przy niskim poziomie nawożenia azotem i wysokim poziomie nawożenia siarką zaobserwowano wzrost jego zawartości. Blagojević i in. [1998] także stwierdzili obniżenie zawartości selenu ogółem w glebie nawożonej wysokimi dawkami nawozów mineralnych (NPK). Fakt ten autorzy tłumaczyli wzrostem masy korzeniowej na skutek nawożenia fosforem, dzięki czemu rośliny miały większy dostęp do zasobów selenu w glebie.

W warunkach doświadczenia własnego zawartość selenu ogółem w środowisku glebowym podlegała stałym wahaniom i wykazywała zmienność sezonową. W glebie, na której obornika nie stosowano, sezonowe zmiany zawartości tego pierwiastka ogółem były jednak niewielkie. W pierwszym i drugim roku po aplikacji obornika, zwłaszcza w dawkach 20 i $40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, zawartość selenu ogółem w pełni wegetacji roślin wzrosła, a przy końcu sezonu wegetacyjnego wykazano obniżenie jego zawartości. W trzecim i czwartym roku po zastosowaniu obornika najwyższą zawartość tego pierwiastka wykazano natomiast wiosną, a w czasie wegetacji roślin jego zawartość w glebie obniżała się. Według Gissel-Nielsen [1998], uwalnianie selenu z substancji organicznej i łu jest procesem bardzo wolnym. Selen uwalniany zimą był dostępny dla roślin wiosną,

gdy plon traw był jeszcze niski, dając relatywnie wysokie zawartości tego pierwiastka. Jednakże w trakcie wzrostu roślin, latem, rośliny pobierają mniej selenu i pierwiastek ten rozproszcza się w większej masie roślinnej, dlatego jego zawartość w roślinach zmniejsza się jako efekt rozcieńczenia.

Czynniki antropogeniczne, w tym działalność rolnicza, mogą prowadzić do wzbogacenia poziomu wierzchniego gleb, zarówno w pierwiastki niezbędne do życia organizmów żywych, jak i nieistotne z punktu widzenia potrzeb pokarmowych roślin i zwierząt. W związku z powyższym zachodzi potrzeba oceny zasobności gleb nie tylko pod względem zawartości całkowitej mikroelementów, ale także ich form dostępnych dla roślin [Cieśla i in. 1994, Dąbkowska-Naskręt i in. 2004]. Metody specjacji selenu w glebach pozwalają na uzyskanie informacji dotyczących procesów geochemicznych selenu, przypuszczalnych mechanizmów reakcji rozpuszczalnych form tego pierwiastka oraz wpływu czynników takich jak pH i stopień utlenienia na formy chemiczne oraz mobilność selenu w środowisku glebowym. Wielu autorów [Cheng i in. 1980, Sèby i in. 1997, Bujdoś i in. 2000, Sharmasarkar i Vance 2002, Hagarova i in. 2005] wskazuje, że zawartość selenu dostępnego i przyswajalnego dla roślin różni się w zależności od warunków środowiska – zarówno klimatycznych, jak i geochemicznych.

W warunkach przeprowadzonych badań, w trakcie zmianowania wykazano istotny wpływ nawożenia obornikiem na kształtowanie się zawartości badanych frakcji selenu. W glebie, na której uprawiano ziemniaki, ich zawartość zwiększała się wraz ze wzrostem dawki obornika, a największy wpływ w tym zakresie wykazano po zastosowaniu największej ilości tego nawozu. W okresie wegetacyjnym pszenicy ozimej tylko wzrastające do $60 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ dawki obornika zwiększały zawartość selenianów(VI), natomiast zawartość selenianów(IV) wzrastała wraz z ilością nawozu wprowadzonego do gleby. Zawartość selenu zasocjowanego z tlenkami metali, związanego z substancją organiczną oraz frakcji rezydualnej zwiększyła się istotnie pod wpływem nawożenia obornikiem w stosunku do ich zawartości w glebie, na której obornika nie stosowano. Nawożenie obornikiem w zróżnicowany sposób wpływało na kształtowanie się zawartości badanych frakcji selenu w glebie w czasie wegetacji jęczmienia jarego. W przypadku selenianów(VI) i selenianów(IV) największą ich zawartość wykazano w glebie, na której obornika nie stosowano. Aplikacja obornika w istotny sposób wpływała na ich zawartość w glebie, jednak nie wykazano jednoznacznego ukierunkowania oddziaływania tego nawozu. Wzrastające dawki obornika zwiększyły natomiast zawartość selenu zasocjowanego z tlenkami metali oraz skompleksowanego z substancją organiczną w badanej glebie. Najwyższą zawartość tych frakcji wykazano po zastosowaniu największej ilości nawozu. Nawożenie obornikiem w zróżnicowany sposób wpływało także na kształtowanie się zawartości frakcji selenu w glebie, na której uprawiano kukurydzę. Najniższą zawartość selenianów(VI) stwierdzono na obiekcie, na którym nawóz ten stosowano w dawce $20 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Zawartość tej frakcji systematycznie wzrastała do dawki $80 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Podobną tendencję zauważono w przypadku selenianów(IV), jednak zawartość tej frakcji wzrastała do dawki $60 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ obornika. Obniżenie jej

zawartości stwierdzono natomiast po aplikacji największej ilości tego nawozu. Nawożenie obornikiem wpływało istotnie na zawartość selenu związanego z tlenkami metali, selenu skompleksowanego z substancją organiczną oraz frakcji rezydualnej, chociaż nie wykazano wyraźnego ukierunkowania w tym zakresie. Zastosowanie azotu wpływało na zawartość poszczególnych frakcji selenu w glebie w sposób niejednoznaczny. W glebie pod uprawą ziemniaka istotnie zwiększyło zawartość selenianów(VI). Wykazano także istotny wzrost zawartości selenianów(VI) i selenianów(IV) w glebie pod uprawą pszenicy ozimej. W glebie, na której uprawiano jęczmień jary i kukurydzę, nie stwierdzono na ogół wpływu azotu na zawartość poszczególnych frakcji selenu lub wpływ ten – chociaż istotny statystycznie – nie wykazywał jednoznacznego ukierunkowania.

Wyniki analizy sekwencyjnej gleb Irlandii, badanych przez Sébiego i in. [1997] wykazały, że seleniany(IV) były główną występującą w nich formą selenu, mimo że stanowiła ona zaledwie 15% zawartości selenu ogółem. W glebach tych stwierdzono także wysoki poziom selenu – przypuszczalnie występującego w połączeniach organicznych. Podobnie jak w badaniach własnych, dominującą frakcją selenu w poziomach powierzchniowych gleb badanych przez Wang i Chen [2003] była frakcja związana z tlenkami metali oraz z substancją organiczną. Gleby te, sklasyfikowane jako Entisols i będące w użytkowaniu rolniczym, charakteryzowały się prawie 2-krotnie wyższą zawartością selenu i azotu ogółem oraz zbliżoną zawartością węgla związków organicznych, jak gleba płowa w badaniach własnych. Zdaniem Fagerii i in. [2002] występowanie poszczególnych frakcji selenu w glebach jest zróżnicowane i określa w dużym stopniu jego mobilność oraz dostępność dla roślin. Pogląd ten potwierdzają wyniki badań własnych. Czynniki takie jak zawartość substancji organicznej oraz zawartość i formy tlenków, a także węglanów oraz pH zmieniają właściwości gleb, bioprzyswajalność oraz transport pierwiastków śladowych w środowisku glebowym oraz w agroekosystemie.

W badaniach własnych udział selenianów(VI) w całkowitej puli selenu w glebie, w trakcie zmianowania, wahał się w zakresie od 11 do 24% i na ogół obniżał się wraz ze wzrostem dawki obornika. Wyjątek stanowiła gleba pod uprawą kukurydzy, w której po zastosowaniu obornika stwierdzono wzrost udziału tej frakcji selenu. Według Chao i Sanzolone [1989], w glebach o wysokim pH i niskiej zawartości tlenków Al, Mn i Fe selen – występując na ogół w formie selenianu(VI) – jest bardzo mobilny i łatwo przyswajalny dla roślin. W badaniach własnych udział selenianów(IV) w całkowitej ilości selenu w glebie w zmianowaniu występował w przedziale od 14 do 25%. Tylko w glebie pod uprawą ziemniaka stwierdzono obniżenie udziału tej frakcji selenu wraz ze wzrostem dawki obornika. Należy podkreślić, że udział najlepiej przyswajalnych dla roślin frakcji selenu w glebie (SeFI i SeFII), w warunkach doświadczenia, stanowił od 25 do 48% całkowitej zawartości selenu, a najwyższy stwierdzono w glebie pod uprawą pszenicy ozimej w drugim roku po aplikacji obornika. Kabata-Pendias i Pendias [1999] oraz inni autorzy [Cooke i Bruland 1987, Fageria i in. 2002, Sharmasarkar i Vance 2002, Broadley i in. 2006, Pyrżyńska 2007] podają,

że w glebach o średnich warunkach oksydacyjnych i pH zbliżonym do obojętnej frakcją dominującą są seleniany(IV), jednak połączenia tej frakcji selenu zarówno z tlenkami, jak i wodorotlenkami żelaza oraz materią organiczną są raczej stabilne i w związku z tym pierwiastek ten może być słabo dostępny dla roślin. W warunkach doświadczenia własnego udział asocjacji selenu z tlenkami metali występował w glebie w trakcie zmianowania na dość wyrównanym poziomie. W pierwszych dwóch latach po aplikacji obornika zauważono obniżenie udziału tej frakcji selenu wraz ze wzrostem jego dawki, natomiast w trzecim roku po oborniku udział frakcji zasocjowanej z tlenkami metali w glebie był niezależny od jego dawki. Frakcja selenu skompleksowana z materią organiczną gleby dominowała w glebie, zwłaszcza pod uprawą ziemniaka i pszenicy ozimej i na ogół wzrastała wraz ze zwiększaniem dawki wprowadzonego do gleby obornika. W glebach badanych przez Gustafssona i Johnssona [1992], zwłaszcza w kwaśnych, selen był bardzo silnie związany przez substancję organiczną, co obniżyło jego dostępność dla roślin. Selen frakcji rezydualnej stanowił, w warunkach badań własnych, średnio około 10% ogółu selenu i występował na zbliżonym poziomie niezależnie od zastosowanej dawki obornika. Niektórzy autorzy [Gissel-Nielsen 1975, Emerick i De Marco 1991] wskazują, że obecność wodorotlenków żelaza umożliwia wiązanie selenu przez minerały ilaste, przy czym połączenia te są raczej stabilne, a zatem jest on słabo dostępny dla roślin. Świadczy to o tym, że fitoprzyswajalność dodanego do gleby selenu jest większa z gleb piaszczystych niż z ilastych. Gleby ilaste jednak bardzo często zawierają większą ilość naturalnego selenu niż piaszczyste i w konsekwencji pobieranie tego pierwiastka przez rośliny jest wyższe z gleb ilastych.

Przebieg procesów enzymatycznych w glebie jest często trudny do dokładnego poznania z uwagi na wpływ różnych czynników kształtujących właściwości środowiska glebowego [Koper i Piotrowska 2001]. Wyniki badań własnych wskazują, że nawożenie obornikiem wyraźnie stymulowało aktywność dehydrogenazową gleby. Należy podkreślić, że była ona najwyższa w pierwszym roku po aplikacji obornika. Furczak i in. [1991] wykazali, że gleby torfowe charakteryzowała wyższa aktywność dehydrogenazowa w porównaniu z glebami mineralnymi, co zapewne było związane z dużą zawartością węgla związków organicznych w środowisku torfowym. Wielu autorów [Frankenberger i Dick 1983, Włodarczyk 2000, Koper i Siwik-Ziomek 2001, Włodarczyk i in. 2002, Koper i in. 2004] wskazuje na zależności między aktywnością dehydrogenaz a zawartością glebowej materii organicznej, liczebnością i biomasą drobnoustrojów glebowych, zawartością węgla i azotu związków organicznych, a także aktywnością innych enzymów obecnych w glebie. W warunkach przeprowadzonych badań nawożenie azotem wpływało na aktywność dehydrogenaz glebowych w sposób niejednoznaczny. W glebie, na której uprawiano ziemniaki, w każdym z badanych terminów wykazano istotny wpływ azotu na jej aktywność. W maju i lipcu obniżała się ona wraz ze wzrostem dawki tego składnika, natomiast we wrześniu wpływ ten nie był jednoznacznie ukierunkowany. Istotne oddziaływanie nawożenia azotem na aktywność dehydrogenazową stwierdzono w glebie pobranej

w marcu i lipcu, w trakcie uprawy pszenicy ozimej, chociaż nie wykazano ukierunkowanego działania azotu w tym zakresie. Nawożenie azotem istotnie zwiększyło aktywność tych enzymów w glebie pobranej w maju pod uprawą jęczmienia jarego, natomiast obniżyło w glebie pod uprawą kukurydzy. Nawożenie mineralne, według Hadasa i Kautsky'ego [1994], powodowało prawie 2-krotne zwiększenie aktywności dehydrogenaz glebowych, a nawożenie gleby organicznej obornikiem zwiększyło wyraźnie aktywność tych enzymów w porównaniu z nawożeniem mineralnym. W glebach badanych przez Spychaj-Fabisiak i Smolińskiego [2004] czynnikiem stymulującym wzrost aktywności dehydrogenazowej było nawożenie azotem. Autorzy stwierdzili ponadto, że poziom aktywności dehydrogenaz w glebie wzrastał wraz z liczebnością drobnoustrojów i tempem ich metabolizmu, pozwalając na wykorzystanie rezerw węgla organicznego.

Zdaniem Zeppa i in. [1988] wyraźnie wyższa aktywność peroksydaz glebowych występowała wraz z wyższą zawartością zarówno kwasów huminowych, jak i fulwowych. Wykazano przy tym, że kwasy fulwowe mogą współzawodniczyć o centrum aktywne peroksydaz i w ten sposób inaktywują enzym, natomiast kwasy huminowe zwiększają ich stabilność. Według Davidsona i in. [1995] peroksydazy w glebie biorą udział w syntezie kwasów huminowych, przy czym polimeryzacja rozłożonej materii organicznej i ściółki wpływa na gromadzenie się węgla związków organicznych w glebie, a także na biologiczną dostępność azotu glebowego. Wyniki badań własnych wskazują, że nawożenie obornikiem wyraźnie stymulowało aktywność peroksydaz w glebie, w trakcie zmianowania, a maksymalne wartości aktywności enzymatycznej zanotowano w pierwszym roku po aplikacji obornika. Nawożenie azotem obniżało lub nie miało istotnego wpływu na aktywność peroksydaz w glebie, chociaż niektórzy autorzy [Prasad i in. 1999, Bescolo i in. 2003, Malinowska i Smolik 2006, Smolik i Malinowska 2006] stwierdzili, że nawożenie NPK oraz zastosowanie soli miedzi, ołowiu, glinu i cynku wyraźnie zwiększało tę aktywność.

Nawożenie obornikiem wykazuje zwykle dodatni wpływ na wzrost aktywności biologicznej gleby – zarówno na biomasę drobnoustrojów, jak i aktywność enzymatyczną [Russel 1974, Pascual i in. 1998]. Jednakże opinie na temat roli nawożenia mineralnego w kształtowaniu aktywności biologicznej gleby są jak do tej pory często rozbieżne. Bender i Rybak [1972] oraz Koper i Piotrowska [2001] wykazali wzrost aktywności katalazy pod wpływem nawożenia mineralnego, natomiast z prac Frankenbergera i Dicka [1983] oraz Cieśli i Kopera [1990] wynika, że nawożenie mineralne, zwłaszcza po długotrwałym stosowaniu wysokich dawek, prowadzi do inhibicji reakcji enzymatycznych. W przeprowadzonych badaniach nawożenie obornikiem istotnie stymulowało aktywność katalazy glebowej w całym okresie badawczym, natomiast wpływ nawożenia azotem na aktywność tego enzymu był niejednoznaczny. W pierwszym i trzecim roku po aplikacji obornika nawożenie azotem na ogół obniżało aktywność katalazową, natomiast w glebie pod uprawą kukurydzy, w czwartym roku po oborniku, zanotowano jej wzrost. Należy podkreślić, że aktywność katalazy zmieniała się w okresie badawczym, a tendencje tych zmian były zbliżone w glebie

kontrolnej i nawożonej obornikiem. Najwyższą aktywność tego enzymu stwierdzono w glebie pod uprawą pszenicy ozimej, w drugim roku po oborniku, a następnie jego aktywność obniżała się w trakcie zmianowania. Z danych literaturowych wynika, że istnieją dodatnie zależności między aktywnością glebowej katalazy i zawartością materii organicznej, biomasą drobnoustrojów, zawartością ATP, żyznością gleby, a także aktywnością dehydrogenaz [Gliński i in. 1986, Koper i in. 1999, Margesin i in. 2000].

W warunkach naturalnych wielkość populacji i czynności życiowe drobnoustrojów środowiska glebowego podlegają stałym wahaniom. Aktywność enzymatyczna gleby wykazywała wyraźną zmienność sezonową oraz znaczne fluktuacje, zależne głównie od warunków klimatycznych, dostępności substratu oraz od gatunku rośliny uprawianej w zmianowaniu. Obserwacje dotyczące zmian sezonowych aktywności dehydrogenazowej wskazują, że w glebie pobranej w pierwszym i czwartym roku po aplikacji obornika dehydrogenazy wykazywały największą aktywność jesienią. W drugim i trzecim roku po zastosowaniu obornika, w trakcie uprawy pszenicy ozimej i jęczmienia jarego, najwyższą aktywność dehydrogenaz stwierdzono natomiast wiosną. W badaniach własnych najwyższą aktywność peroksydaz oznaczono w glebie pobranej w maju, na początku wegetacji roślin. Zauważono również tendencję obniżania się aktywności peroksydaz w trakcie zmianowania, chociaż w glebie pod kukurydzą, w czwartym roku po oborniku, aktywność enzymatyczna wzrosła. W badaniach przeprowadzonych przez Kerstettera in. [1998] zawartość peroksydaz, wyekstrahowanych z gleby spod roślinności trawiastej, była wysoka zarówno podczas późnego lata, jak i zimą. Minimalny spadek aktywności peroksydaz podczas zimy wskazuje, że peroksydazy pozostają aktywne w glebie przez długi czas. W okresie badawczym aktywność katalazy na ogół wzrastała znacznie pod koniec sezonu wegetacyjnego i była najwyższa w próbkach gleby pobranej w lipcu lub we wrześniu. Według Kuprevicha i Scherbakovej [1971] najwyższa aktywność enzymatyczna występuje latem (w lipcu i sierpniu) oraz na początku jesieni, a minimalna przypada na miesiące zimowe. Cieśla i in. [1977] stwierdzili natomiast, że enzymy są stosunkowo aktywne w końcu wiosny, latem następuje obniżenie ich aktywności, a jesienią ponowny jej wzrost. Badania Kopera i Piotrowskiej [2001] wykazały najwyższą aktywność dehydrogenaz wiosną, co autorzy tłumaczą wysokimi temperaturami przy dostatecznej wilgotności. Aktywność enzymów glebowych odzwierciedla kierunek i charakter procesów biogeochemicznych, a także całość podstawowych przemian związanych z biologią gleb i jej właściwościami fizykochemicznymi [Kucharski 1997, Russel 2005, Brzezińska 2006, Piotrowska-Cyplik i in. 2007]. W literaturze jednak sporadycznie publikowane są dane dotyczące powiązań między zawartością selenu w glebie a jej aktywnością enzymatyczną. Powiązania między zawartością selenu (w szczególności jedną z jego form – kwasem selenowym H_2SeO_3) a aktywnością oksydoreduktaz w glebie badali Nowak i in. [2002, 2004], stwierdzając, że dodatek selenu do gleb znacząco wpływa na aktywność oksydoreduktaz, dehydrogenaz i reduktazy azotanowej.

W warunkach doświadczenia własnego wykazano związek między aktywnością enzymatyczną a zawartością selenu ogółem w glebie w trakcie zmianowania. W pierwszym roku po aplikacji obornika w glebie, na której uprawiano ziemniaki, wykazano najwyższe wartości aktywności dehydrogenazowej przy jednoczesnym silnym związku liniowym z zawartością selenu ogółem. Stosunkowo silny związek obu parametrów stwierdzono również w odniesieniu do gleby pod uprawą pszenicy ozimej i jęczmienia jarego, natomiast najniższą aktywność dehydrogenaz i zawartość selenu oraz ich słaby związek z czynnikami doświadczenia wykazano w glebie pod uprawą kukurydzy. Podobne zależności zauważono także między zawartością selenu ogółem a aktywnością glebowych peroksydaz. Aktywność katalazy korelowała również silnie z zawartością selenu ogółem w glebie. Największą aktywność tego enzymu wykazano jednak w drugim roku po aplikacji obornika, gdy zawartość selenu w glebie obniżyła się. W kolejnych latach badań aktywność katalazy w glebie sukcesywnie się obniżała, wykazując nadal silny związek z zawartością selenu ogółem.

Wyniki badań własnych wskazują, że powiązanie zmian zawartości frakcji selenu przyswajalnych dla roślin z aktywnością enzymatyczną okazało się trudniejsze. Zawartość selenianów(VI) wysoko istotnie dodatnio korelowała z aktywnością dehydrogenaz i peroksydaz wyłącznie w glebie pod uprawą ziemniaka. W przypadku zawartości selenianów(IV) stwierdzono ich związek z aktywnością wszystkich badanych enzymów tylko w pierwszym roku po nawożeniu obornikiem oraz w drugim roku – pod uprawą pszenicy ozimej – z aktywnością dehydrogenaz i peroksydaz. Frakcja selenu zasocjowana z tlenkami metali wykazała związek z aktywnością wszystkich badanych oksydoreduktaz w glebie pod uprawą ziemniaka. Zawartość frakcji skompleksowanej z substancją organiczną gleby wykazała związek z aktywnością wszystkich badanych enzymów w pierwszych trzech latach po aplikacji obornika, jednak w trakcie zmianowania związki te ulegały osłabieniu, co było prawdopodobnie związane z wyczerpywaniem się dostępnej dla mikroorganizmów substancji organicznej. Kobus [1995] wskazuje na podobne zależności oraz na wpływ warunków klimatycznych na tempo przemian materii organicznej. W miarę wysuszenia się gleby mikroorganizmy przechodzą w stan spoczynku i są mało aktywne do czasu, kiedy pojawią się korzystniejsze warunki.

W warunkach naturalnych dostępność selenu dla roślin zależy nie tylko od całkowitej zawartości tego pierwiastka w glebie, ale również od jego formy chemicznej oraz od obecności innych jonów zawartych w roztworze glebowym. Rośliny najczęściej pobierają selen w postaci selenianów(IV) i selenianów(VI) [Ylärinta 1983, 1985]. O niskiej zawartości selenu w roślinach nie zawsze świadczy niska jego zawartość w glebie, gdyż wiele czynników, np. forma chemiczna selenu, pH, zawartość frakcji ilastej, tlenków żelaza, materii organicznej, a także konkurencyjnych anionów, wpływa na dostępność tego pierwiastka dla roślin [Gissel-Nielsen i Bisbjerg 1970, Pyrzyńska 2002, Pazurkiewicz-Kocot i in. 2003]. Zhao i in. [2005] podają, że po dodaniu do gleby selenianów(IV) i selenianów(VI) rośliny pobierały w większym stopniu seleniany(VI). Przyswajal-

ność przez rośliny selenu w formie selenianów(IV) była relatywnie niska, co autorzy tłumaczyli jego wyższą absorpcją przez wodorotlenki metali w glebie lub przejściem w formę selenu elementarnego względnie selenku. Badania Wierzbickiej i in. [2007] wykazały, że nie jest obojętne, jaka forma selenu zostaje użyta do wzbogacenia roślin w ten pierwiastek. Pomimo że seleniany(IV) są w mniejszym stopniu dostępne i pobierane przez rośliny, to właśnie ta forma selenu okazała się najkorzystniejsza podczas hodowli roślin cebuli, bowiem seleniany(IV) są metabolizowane przez rośliny do Se-metyloselenocysteiny, która postrzegana jest jako aminokwas o największym potencjale antykancerogennym [Hawkesford i Zhao 2007, Wąsowicz i in. 2007]. Duże znaczenie dla dostępności selenu dla roślin wyższych mają grzyby mikoryzowe i bakterie rizosfery, które stanowią bezpośrednie ogniwo między glebą a korzeniami roślin [Terry i in. 2000, Szymańska i Hawrylak 2007]. Pozytywny wpływ bakterii rizosfery na stopień kumulacji selenu w roślinach może wynikać z faktu przekształcania selenu w formy bardziej przyswajalne przez rośliny, możliwość stymulacji przez bakterie transporterów siarczanowych związanych także z pobieraniem selenu lub ze wzrostem korzeni roślin w obecności mikroorganizmów.

W badaniach własnych wzrastające dawki obornika istotnie zwiększały zawartość selenu w częściach nadziemnych ziemniaka w obu badanych fazach rozwojowych tylko do poziomu $40 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, wyższe dawki nawozu zawartość tę obniżały. Podobne wyniki uzyskano określając zawartość selenu w bulwach tej rośliny w fazie zamierania liści i łodyg. Jego nagromadzenie w bulwach ziemniaka w fazie pełni kwitnienia wzrastało systematycznie wraz ze zwiększeniem ilości obornika w glebie. Nawożenie azotem powodowało na ogół istotny wzrost zawartości selenu w częściach nadziemnych ziemniaka w obu fazach fenologicznych, podobnie jak w bulwach we wcześniejszej fazie rozwojowej. Odwrotną tendencję wykazano w bulwach tej rośliny w fazie zamierania liści i łodyg, gdzie nawożenie wysokimi dawkami azotu istotnie obniżyło zawartość tego pierwiastka. We wcześniejszych badaniach Borowskiej i Janowiak [2002] stwierdzono prawie dwukrotny wzrost zawartości selenu w glebie pod wpływem nawożenia organicznego w porównaniu z glebą poletek kontrolnych, podczas gdy zawartość selenu w bulwach ziemniaka obniżyła się wraz ze wzrostem dawek azotu. W doświadczeniach Poggi i in. [2000] zawartość selenu w bulwach ziemniaka wzrastała wraz ze zwiększeniem dawki selenu dodanego zarówno w formie selenianów(IV), jak i selenianów(VI), a dodatek kwasów huminowych spowodował znaczący wzrost zawartości tego pierwiastka w bulwach ziemniaka. Kwasy huminowe zwiększyły przyswajalność selenianów(VI) przez rośliny. Z badań Turakainena [2007] wynika, że seleniany(VI) były pobierane przez rośliny ziemniaka we wczesnych stadiach rozwojowych, a zastosowanie nawożenia selenowego przyczyniło się do poprawienia jakości przechowywanych bulw ziemniaka, obniżając jednocześnie zawartość glikoalkaloidów w sadzeniakach.

Wyniki badań własnych wskazują, że zawartość selenu w częściach nadziemnych pszenicy w obu fazach rozwojowych wzrastała wraz ze zwiększeniem

nawożenia obornikiem do dawki $40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Dalsze zwiększanie dawki tego nawozu naturalnego istotnie obniżyło jego zawartość. W przypadku korzeni pszenicy zawartość selenu na ogół zwiększała się wraz ze wzrostem dawki obornika. Nawożenie azotem zwiększyło jego zawartość w korzeniach pszenicy w obu fazach rozwojowych. Analiza statystyczna wykazała istotny wpływ nawożenia obornikiem na koncentrację tego pierwiastka w częściach nadziemnych jęczmienia jarego w obu fazach rozwojowych. Najwięcej tego pierwiastka zgromadziły rośliny nawożone nawozem naturalnym w dawkach 40 i $60 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. W podobny sposób nawożenie obornikiem wpływało na kumulację selenu w korzeniach jęczmienia. Nawożenie azotem na ogół zwiększyło nagromadzenie selenu w roślinach jęczmienia, z wyjątkiem części nadziemnych w dojrzałości woskowej twardej, w których nie stwierdzono istotnego wpływu tego składnika. W częściach nadziemnych i korzeniach kukurydzy, w fazie piątego liścia, największą zawartość selenu wykazano na obiektach, na których obornik stosowano w dawkach 20 i $40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Części nadziemne roślin w pełnej dojrzałości woskowej zgromadziły największą ilość selenu na obiektach nawożonych 40 i $60 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ obornika, podczas gdy w korzeniach największą zawartość tego pierwiastka wykazano po zastosowaniu dawek 20 i $40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Podobne wyniki dotyczące kumulacji selenu przez rośliny kukurydzy uzyskali Munier-Lamy i in. [2007], którzy badali również wpływ grzybów mikoryzowych na przyswajalność selenu i jego przemieszczanie z gleby do korzeni i części nadziemnych roślin.

Rozmieszczenie selenu w różnych częściach roślin zależy od gatunku, fazy rozwojowej oraz ich stanu fizjologicznego. Według Terry'ego i in. [2000] roślinne akumulatory selenu gromadzą ten pierwiastek głównie w młodych liściach, we wczesnych fazach rozwojowych (wegetatywnych), natomiast podczas fazy reprodukcyjnej rośliny kumulują selen głównie w nasionach, a jego zawartość w liściach zdecydowanie wtedy spada. Autorzy ci podają, że w dojrzałych roślinach zbożowych zawartość selenu jest podobna w ziarniakach i korzeniach, przy jego mniejszej ilości w łodygach i liściach. Z badań Terry'ego i in. [2000], Shanker i Srivastava [2001] oraz Li i in. [2008] wynika, że translokacja selenu z korzeni do pędów zależy przede wszystkim od jego formy chemicznej, przy czym seleniany(VI) są na ogół transportowane łatwiej niż seleniany(IV), czy selenometionina. Jest to spowodowane szybszym przekształcaniem selenianów(IV) do form organicznych zatrzymywanych w korzeniach, co ogranicza przemieszczanie selenu do łodyg. Seleniany(VI) były natomiast bardzo mobilne w ksylemie i tylko niewielka ich ilość została przekształcona w formy organiczne tego pierwiastka.

W warunkach przeprowadzonych badań nawożenie obornikiem podobnie wpływało na przemieszczanie się selenu z roztworu glebowego do części nadziemnych oraz bulw ziemniaka w obu fazach rozwojowych roślin. Mobilność tego pierwiastka obniżała się wraz ze wzrostem jego dawki. Przemieszczanie się selenu z gleby do części nadziemnych pszenicy ozimej we wcześniejszej fazie rozwojowej było najwyższe wówczas, gdy stosowano 20 i $40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ obornika. W fazie dojrzałości woskowej twardej selen najłatwiej przemieszczał się

z gleby do części nadziemnych na obiektach, na których zastosowano nawożenie obornikiem na poziomie 40 i 60 t·ha⁻¹. Współczynniki bioakumulacji selenu dla korzeni pszenicy wskazują, że w fazie widocznych 5 rozkrzewień łatwiej przemieszczał się on z gleby wraz ze zwiększaniem nawożenia obornikiem, podczas gdy u roślin w dojrzałości woskowej twardej wykazano tendencję odwrotną. Mobilność selenu z gleby do części nadziemnych jęczmienia jarego w fazie początku wzrostu źdźbła była najwyższa na obiektach, gdzie stosowano 20 i 40 t·ha⁻¹ obornika. W przypadku korzeni jęczmienia zwiększanie dawek obornika spowodowało mniejszą mobilność tego pierwiastka z gleby. Współczynniki bioakumulacji dla części nadziemnych i korzeni jęczmienia w dojrzałości woskowej twardej wskazują, że selen najłatwiej przemieszczał się z gleby na obiektach nawiezionych 20 i 40 t·ha⁻¹ obornika, a dalsze zwiększanie dawek tego nawozu obniżyło jego mobilność. Stosowany obornik w podobny sposób wpływał na przemieszczanie się tego pierwiastka z gleby do badanych części kukurydzy. Zauważono tendencję do obniżenia jego mobilności wraz ze zwiększaniem dawki obornika wprowadzonego do gleby.

Wyliczone współczynniki translokacji selenu dla pszenicy ozimej we wcześniejszej fazie rozwojowej wskazują, że przemieszczanie tego pierwiastka z korzeni do części nadziemnych obniżało się wraz ze zwiększaniem nawożenia obornikiem. Współczynniki translokacji selenu dla jęczmienia jarego w początku wzrostu źdźbła świadczą o tym, że zastosowanie obornika na poziomie 20 i 40 t·ha⁻¹ sprzyja przemieszczaniu selenu z korzeni do części nadziemnych roślin. W roślinach w dojrzałości woskowej twardej pierwiastek ten był najmniej mobilny po aplikacji największej ilości nawozu. Transport selenu z korzeni do części nadziemnych kukurydzy zachodził podobnie w obu fazach rozwojowych niezależnie od wielkości dawki obornika. W badaniach własnych stwierdzono również istotną korelację między zawartością selenu w korzeniach badanych roślin a zawartością selenu ogółem, selenianów(VI) i selenianów(IV) w glebie. Wyniki te potwierdzają rezultaty uzyskane przez Cartesa i in. [2005].

We współczesnych badaniach [Stadlober i in. 2001, Lyons i in. 2005, Bradley i in. 2006, Hawkesford i Zhao 2007, Turakainen 2007] coraz więcej uwagi poświęca się strategii biofortyfikacji, czyli produkcji żywności bogatej w biodostępne substancje odżywcze, w tym również mikroelementy. Biofortyfikacja w odniesieniu do selenu obejmuje nie tylko wzbogacanie pastwisk czy nawożenie roślin uprawnych (szczególnie pszenicy) tym pierwiastkiem, ale także wyhodowanie odmian roślin uprawnych o zwiększonej efektywności wykorzystania selenu w celu uzyskania wyższej jego zawartości w częściach jadalnych. Dobrym przykładem zastosowania biofortyfikacji agronomicznej jest Finlandia, gdzie już od 1984 r. w praktyce rolniczej stosuje się dodatek selenianu(VI) sodu do wszystkich wieloskładnikowych nawozów mineralnych w ilości 16 mg·kg⁻¹ dla zbóż oraz 6 mg·kg⁻¹ na łąki, co przyczyniło się do ponad 7-krotnego wzrostu zawartości selenu w ziarnie zbóż [Varo i in. 1988, Ylärinta 1990, Aro i in. 1995, Euroła 2004, Aspila 2005, Ekholm i in. 2005, Hartikainen 2005b]. W konsekwencji spożycie selenu przez ludzi wzrosło z 25 do ponad 110 µg na dzień,

a wskutek tego zawartość selenu w osoczu krwi zwiększyła się z 60-70 do ponad $100 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$. Zapotrzebowanie natomiast zwierząt na selen pokrywa pasza o zawartości 0,1-0,3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m. Przy spadku do poziomu 0,010 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m. mogą wystąpić objawy niedoboru, zaś zawartość selenu w paszy powyżej 3,0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m. może być toksyczna dla zwierząt [Mayland 1994, Kabata-Pendias i Pendias 1999]. Badania nad wdrażaniem strategii biofortyfikacji agronomicznej selenu prowadzone są nie tylko w krajach skandynawskich, ale również ostatnio w Wielkiej Brytanii [Broadley i in. 2006, Hawkesford i Zhao 2007], Austrii [Stadlober i in. 2001, Sager 2007] i Australii [Lyons i in. 2005a, b]. Większość jednak autorów wskazuje na potrzebę monitoringu statusu selenowego w środowisku, ze względu na wąski margines bezpieczeństwa między niedoborem, zawartością optymalną a dawką toksyczną.

Kuczyńska i Biziuk [2007], podobnie jak Zachara i in. [2007], przeprowadzili badania dotyczące udziału poszczególnych grup produktów spożywczych w dostarczaniu selenu w krajowych racjach pokarmowych i stwierdzili, że ważnym źródłem tego pierwiastka są produkty zbożowe. W badaniach własnych wykazano, że ziarno pszenicy ozimej nagromadziło od 0,152 do 0,439 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m. selenu, przy czym największą kumulację stwierdzono w ziarnie z obiektu nawożonego obornikiem w dawce $60 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Zdaniem Kabaty-Pendias i Pendiasa [1999] selen w ziarnie zbóż wykazuje zróżnicowanie regionalne. Autorzy stwierdzili, że zawartość selenu w ziarnie pszenicy z obszaru Polski występuje w przedziale od 0,169 do 1,250 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m., przy średniej zawartości 0,680 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m. Zawartość selenu w ziarnie jęczmienia w Polsce wynosiła od 0,200 do 1,213 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m. (średnio 0,488 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m.). Wyniki badań własnych wskazują, że zawartość selenu w ziarnie jęczmienia kształtowała się na poziomie od 0,110 do 0,266 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, przy czym, podobnie jak u pszenicy ozimej, zastosowanie obornika w dawce $60 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ spowodowało największą kumulację tego pierwiastka. Zawartość selenu w ziarnie kukurydzy, po zastosowaniu obornika i azotu, mieściła się w przedziale od 0,061 do 0,342 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Ziarno kukurydzy z obiektu nawożonego obornikiem na poziomie 20 i $40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ zawierało średnio ponad 4-krotnie więcej selenu niż nie nawożone tym nawozem. Wzbogacenie w selen stanowiska, na którym uprawiano kukurydzę, spowodowane było prawdopodobnie wysoką kumulacją tego pierwiastka w resztkach poźniwnych jęczmienia jarego. Ducsay i Ložek [2006] badali wpływ dolistnego nawożenia selenianem(IV) na zawartość selenu w ziarnie pszenicy ozimej i stwierdzili, że zastosowanie dawki $10 \text{ g Se}\cdot\text{ha}^{-1}$ 3-krotnie zwiększyło zawartość selenu w ziarnie w odniesieniu do obiektu kontrolnego, jednak warunki pogodowe przyczyniły się do obniżenia pobrania tego mikroelementu przez rośliny. W badaniach własnych natomiast warunki pogodowe w trakcie uprawy zbóż charakteryzowały się wyższymi temperaturami i niższymi opadami niż średnia za wielolecie, co prawdopodobnie przyczyniło się do większej kumulacji selenu w ziarnie. Bisbjerg [1972] i Johnsson [1991b] również podkreślają, że zmiany warunków pogodowych mogą mieć wpływ na zawartość selenu w ziarnie zbóż. Duża ilość opadów oraz niska temperatura mogą przyczynić się do obniżenia zawartości

selenu w roślinach z uwagi na występowanie w glebach warunków redukcyjnych związanych z przejściem selenianów(VI) w formy mniej dostępne dla roślin (seleniany(IV), selen elementarny lub selenki). Autorzy stwierdzili także dodatnią korelację między zawartością selenu w ziarnie pszenicy a ilością opadów w okresie wegetacyjnym. Pszenica jara, w związku z lepiej rozwiniętym systemem korzeniowym, jest jednak mniej wrażliwa na wysuszenie w czasie wiosny i wczesnego lata niż pszenica ozima.

Wyniki badań własnych potwierdzają również spostrzeżenia innych autorów [Gissel-Nielsen i in. 1984, Kabata-Pendias i Pendias 1999, Terry i in. 2000, Li i in. 2008], że skomplikowane interakcje zachodzące w środowisku korzeni roślin modyfikują właściwości selenu w każdych specyficznych warunkach. Świadczy to o tym, że zarówno rozmieszczenie selenu w glebie, jak i jego fitoprzyswajalność są wartościami wypadkowymi wielu procesów.

5. WNIOSKI

1. Nawożenie obornikiem istotnie zwiększało zawartość selenu ogółem w glebie. Nie wykazano natomiast jednoznacznego wpływu azotu w tym zakresie. Zawartość tego mikroelementu w całym okresie badawczym zależała od ilości węgla w związkach organicznych i azotu w glebie.
2. W warunkach prowadzonych badań zawartość wszystkich badanych frakcji selenu wzrastała na ogół wraz ze wzrostem dawki obornika. W glebie dominowała frakcja selenu skompleksowana z materią organiczną, której udział w całkowitej puli selenu wynosił ponad 30%. Udział fitodostępnych frakcji selenu (SeFI i SeFII) stanowił od 25 do 48% całkowitej zawartości tego pierwiastka i obniżał się na ogół wraz ze zwiększaniem ilości wprowadzonego do gleby obornika.
3. Aktywność enzymatyczna gleby wykazywała wyraźną zmienność sezonową oraz zależała od warunków pogodowych, dostępności substratu, a także gatunku rośliny uprawianej w zmianowaniu. Nawożenie obornikiem wyraźnie stymulowało aktywność badanych oksydoreduktaz glebowych, nie stwierdzono natomiast jednoznacznego wpływu azotu w tym zakresie.
4. Stwierdzono ścisłą zależność między aktywnością enzymatyczną gleby a zawartością w niej selenu ogółem. W okresie zmianowania, w miarę wyczerpywania się zasobów węgla w związkach organicznych, aktywność badanych oksydoreduktaz sukcesywnie się obniżała, wykazując nadal silny związek z zawartością selenu ogółem.
5. Aktywność enzymatyczna gleby była ściśle związana z zawartością przyswajalnych dla roślin frakcji selenu tylko w pierwszym roku po zastosowaniu obornika, a z frakcją skompleksowaną z substancją organiczną aż przez 3 lata. W miarę upływu czasu zależności te ulegały osłabieniu, co prawdopodobnie było związane z wyczerpywaniem się dostępnej dla mikroorganizmów substancji organicznej.
6. Nawożenie obornikiem spowodowało wzrost zawartości selenu w częściach nadziemnych badanych gatunków roślin. Na ogół najwięcej tego pierwiastka zgromadziły rośliny nawożone obornikiem w dawce $40 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$. Stosowany w doświadczeniach azot zwiększał kumulację selenu w częściach nadziemnych roślin tylko we wczesnych fazach rozwojowych. Nie wykazano takiego wpływu w późniejszych okresach ich wegetacji.
7. W początkowym okresie wegetacji zawartość selenu w korzeniach roślin wzrastała wraz ze zwiększaniem dawki obornika, natomiast w miarę postępu wegetacji wpływ ten obserwowano tylko do dawki $60 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$. Zawartość selenu w korzeniach roślin (oprócz jęczmienia jarego) zwiększała się także pod wpływem wzrastających dawek azotu.

8. W większości przypadków zawartość selenu w korzeniach roślin w największym stopniu skorelowana była z zawartością selenu ogółem oraz jego formami przyswajalnymi dla roślin – selenianami(VI) i selenianami(IV). W miarę upływu czasu i wyczerpywania się zapasów tego pierwiastka w glebie związki między jego zawartością w glebie i roślinach były wyraźnie słabsze.
9. Mobilność selenu z roztworu glebowego do badanych części ziemniaka i kukurydzy obniżała się wraz ze wzrostem dawki obornika. Współczynniki bioakumulacji dla pszenicy ozimej oraz jęczmienia jarego wskazują, że selen na ogół najłatwiej przemieszczał się z gleby na obiektach nawiezionych obornikiem w dawkach 20 i 40 t·ha⁻¹, a dalsze zwiększanie dawek tego nawozu obniżyło jego mobilność.
10. Translokacja selenu z korzeni do części nadziemnych roślin obniżała się na ogół wraz ze zwiększaniem ilości wprowadzonego do gleby obornika. Spowodowane to było prawdopodobnie szybszym przekształcaniem selenianów(IV) do form organicznych tego pierwiastka zatrzymywanych w korzeniach, co w konsekwencji mogło ograniczać przemieszczanie selenu do części nadziemnych roślin.
11. Nawożenie obornikiem do poziomu 40 t·ha⁻¹ zwiększało zawartość selenu w bulwach ziemniaka i ziarnie kukurydzy; w ziarnie pszenicy ozimej i jęczmienia jarego wzrost ten wykazano również po aplikacji 60 t·ha⁻¹ tego nawozu. Stosowany azot na tle dawek obornika zmniejszał zawartość selenu w bulwach ziemniaka, ziarnie pszenicy i jęczmienia, nie decydował natomiast o gromadzeniu tego pierwiastka w ziarnie kukurydzy.
12. Przeprowadzone badania wskazują, że w celu uzyskania w plonie roślin uprawnych zawartości selenu zbliżonych do wartości optymalnych wskazywane byłoby uzupełnienie nawożenia selenem w formie selenianu(IV) lub selenianu(VI), zwłaszcza w trzecim i czwartym roku po aplikacji obornika. Zapewni to skuteczne i bezpieczne podwyższenie poziomu tego pierwiastka w łańcuchu troficznym.

LITERATURA

- [1] Abuereish G.M., Lahham J.N., 1987. Selenium in soils and plants in the Jordan Valley. *J. Arid Environ.* 12, 1-7.
- [2] Abrahams P.W., 2002. Soils: their implications to human health. *Sci. Tot. Environ.* 291, 1-32.
- [3] Abrams M.M., Burau R.G., 1989. Fractionation of selenium and detection of selenomethionine in a soil extract. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 20(3/4), 221-237.
- [4] Adams M.L., Lombi E., Zhao F.J., McGrath S.P., 2002. Evidence of low selenium concentration in UK bread-making wheat grain. *J. Sci. Food Agric.* 82, 1160-1165.
- [5] Alloway W.H., 1968. Agronomic controls over the environmental cycling of trace elements. *Adv. Agron.* 20, 235-274.
- [6] Antanaitis A., Lubyte J., Antanaitis Š., 2008. Impact of agrochemical and climatic factors on selenium concentration in soils. *Latvian J. Agron.* 10, LLU, 20-24.
- [7] Aro A., Alfhang G., 1998. Effects of selenium supplementation fertilizers on human nutrition and selenium status. [W:] *Environmental Chemistry of Selenium*, W.T. Frankenberger Jr., R.A. Engberg (red.), Marcel Dekker, New York, 81-97.
- [8] Aro A., Alfthan G., Varo P., 1995. Effects of supplementation of fertilizers on human selenium status in Finland. *Analyst* 120, 841-843.
- [9] Arthur J.R., 2003. Selenium supplementation; does soil supplementation help and why? *Proc. Nutr. Soc.* 62, 393-397.
- [10] Aspila P., 2005. History of selenium supplemented fertilization in Finland. *Proc. of Twenty years of selenium fertilization*, Helsinki, Finland, 8-13.
- [11] Axley M.J., Stadtmann T.C., 1989. Selenium metabolism and selenium-dependent enzymes in microorganisms. *Ann. Rev. Nutr.* 9, 127-137.
- [12] Baazis M., 1989. The activity and preliminary characterization of peroxidases in leaves of cultivars of date palm, *Phoenix dactylifera* L. *New Phytol.* 111, 403-411.
- [13] Badora A., 2000. Selen – pierwiastek znany i nieznan. *Biul. Magnezol.* 5(3), 214-221.
- [14] Bañuelos G.S., Meek D.W., 1990. Accumulation of selenium in plants grown on selenium-treated soil. *J. Environ. Qual.* 19, 772-777.
- [15] Bar-Yosef B., Meek D., 1987. Selenium sorption by kaolinite and montmorillonite. *Soil Science* 144(1), 11-19.
- [16] Bender J., Rybak H., 1972. Katalaza jako wskaźnik produktywności gleby. *Pr. Komis. Nauk Rol. Leś.* 33, 33-41.
- [17] Bescolo P.R.S., Menossi M., Jorge R.A., 2003. Aluminium-induced oxidative stress in maize. *Phytochemistry* 62, 181-189.

- [18] Beytut E., Karatas F., Beytut E., 2002. Lambs with white muscle disease and selenium content of soil and meadow hay in the region of Kars, Turkey. *Vet. J.* 163, 214-217.
- [19] Bisbjerg B., 1972. Studies on selenium in plants and soils. Risø Report No 200, Danish Atomic Energy Commission Research Establishment, Denmark, 9-120.
- [20] Blagojević S., Jakovljević B., Žarković B., 1998. Influence of long-term fertilization on the selenium content of calcareous chernozem soil. *J. Environ. Pathol. Toxicol. Oncol.* 17(3-4), 183-187.
- [21] Borkowski J., Dyki B., 2007. Nawożenie gleb selenem. [W:] Selen – pierwiastek ważny dla zdrowia, fascynujący dla badacza, M. Wierzbicka, E. Bulska, A. Pyrzyńska, I. Wysocka, B.A. Zachara (red.), Malamut, Warszawa, 46-53.
- [22] Borowska K., 1995. Selenium content and distribution in selected arable soils of the Pomorze and Kujawy region. *Mengen- und Spurenelemente* 15, 428-434.
- [23] Borowska K., 2002. Uptake and accumulation of selenium and sulfur by plants as related to soil factors in Poland. [W:] Soil Mineral-Organic Matter-Microorganism Interactions and Ecosystem Health. Dynamics, Mobility and Transformation of Pollutants and Nutrients, A. Violante, P.M. Huang, J.M. Bollag, L. Gianfreda (red.) *Developments in Soil Science* 28A, Elsevier, Amsterdam – Boston, 109-115.
- [24] Borowska K., Janowiak J., 2002. Wpływ nawożenia organicznego i zróżnicowanych dawek azotu na zawartość selenu w bulwach ziemniaka i glebie na tle jej niektórych właściwości. *Acta Agrophys.* 70, 55-63.
- [25] Borowska K., Koper J., 2000. The effect of long-term organic fertilization on the selenium content in lessivé soil. *Polish J. Soil Sci.* XXXIII(2), 21-27.
- [26] Borowska K., Koper J., 2001. Changes in selenium content in soil affected by long-term slurry fertilisation. *Humic Subst. Ecosys.* 4, 15-19.
- [27] Borowska K., Koper J., 2007. Rozmieszczenie selenu w glebach. [W:] Selen – pierwiastek ważny dla zdrowia, fascynujący dla badacza, M. Wierzbicka, E. Bulska, A. Pyrzyńska, I. Wysocka, B.A. Zachara (red.), Malamut, Warszawa, 31-45.
- [28] Borowska K., Koper J., Dąbkowska-Naskręt H., 2003. Zawartość selenu w wybranych glebach uprawnych regionu Kujaw i Pomorza. [W:] *Obieg pierwiastków w przyrodzie, cz. II*, B. Gworek, J. Misiak (red.), Wyd. IOŚ, Warszawa, 154-157.
- [29] Borowska K., Koper J., Dąbkowska-Naskręt H., 2004. Zawartość selenu w wybranych glebach organicznych, mineralno-organicznych i madach regionu Kujaw i Pomorza. *Pr. Komis. Nauk Rol. Biol. BTN B* 52, 13-20.
- [30] Borowska K., Malczyk P., Kędzia W., 1994. Zawartość selenu w glebach uprawnych i leśnych województwa bydgoskiego. *Zesz. Nauk. Komitetu „Człowiek i Środowisko” PAN* 8, 33-37.

- [31] 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. *Proc. Nutr. Soc.* 65, 169-181.
- [32] Brown K.M., Arthur J.R., 2001. Selenium, selenoproteins and human health: a review. *Publ. Health Dis.* 4, 593-599.
- [33] Broyer T.C., Johnson C.M., Huston R.P., 1972. Selenium and nutrition of *Astragalus*. I. Effects of selenite or selenate supply on growth and selenium content. *Plant Soil* 36, 635-649.
- [34] Brzezińska M., 2006. Aktywność biologiczna oraz procesy jej towarzyszące w glebach organicznych nawadnianych oczyszczonymi ściekami miejskimi. *Acta Agrophys., Rozprawy i Monografie* 2, 3-164.
- [35] Brzezińska M., Włodarczyk T., 2005. Enzymy wewnątrzkomórkowych przemian redoks (Oksydoreduktazy). *Acta Agrophys., Rozprawy i Monografie* 3, 11-26.
- [36] Bujdoš M., Kubová J., Streško V., 2000. Problems of selenium fractionation in soils rich in organic matter. *Anal. Chim. Acta* 408, 103-109.
- [37] Bujdoš M., Mul'ová J., Kubová J., Medved' J., 2005. Selenium fractionation and speciation in rocks, soils, waters and plants in polluted surface mine environment. *Environ. Geol.* 47, 353-360.
- [38] Burton S.G., 2003. Oxidizing enzymes as biocatalysts. *Trends Biotechnol.* 21(12), 543-549.
- [39] Caldwell B.A., 2005. Enzyme activities as a component of soil biodiversity: A review. *Pedobiologia* 49, 637-644.
- [40] Cao Z.H., Wang X.C., Yao D.H., Zhang X.L., Wong M.H., 2001. Selenium geochemistry of paddy soils in Yangtze River Delta. *Environ. Int.* 26, 335-339.
- [41] Cappon C.J., 1991. Sewage sludge as a source of environmental selenium. *Sci. Tot. Environ.* 100, 177-205.
- [42] Casida L.E. Jr., Klein D.A., Santoro T., 1964. Soil dehydrogenase activity. *Soil. Sci.* 98, 371-376.
- [43] Cartes P., Gianfreda L., Mora M.L., 2005. Uptake of selenium and its antioxidant activity in ryegrass when applied as selenate and selenite forms. *Plant Soil* 276, 359-367.
- [44] Chao T.T., Sanzolone R.F., 1989. Fractionation of soil selenium by sequential partial dissolution. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53(2), 385-392.
- [45] Chen L., Yang F., Xu J., Hu Y., Hu Q., Zhang Y., Pan G., 2002. Determination of selenium concentration in rice in China and effect of fertilization of selenite and selenate on selenium content in rice. *J. Agric. Food Chem.* 50, 71-77.
- [46] Cheng B.Q., Ju S.J., Yue S.R., He R.Z., Sheng S.J., 1980. Selenium in soils of Northern China. *Acta Pedolog. Sin.* 17, 55-61.

- [47] Cieśla W., Dąbkowska-Naskręt H., Borowska K., Malczyk P., Długosz J., Jaworska H., Kędzia W., Zalewski W., 1994. Pierwiastki śladowe w glebach wybranych obszarów Kujaw i Pomorza. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 414, 63-70.
- [48] Cieśla W., Koper J., 1990. Wpływ wieloletniego nawożenia mineralno-organicznego na ukształtowanie się poziomu fosforu organicznego i przyswajalnego oraz aktywności enzymatycznej gleby. *Rocz. Glebozn.* 42(3/4), 73-83.
- [49] Cieśla W., Pech K., Pawluczuk Z., Rześniowiecka-Sulimierska G., 1977. Wstępne badania nad aktywnością fosfatazy i ureazy w czarnoziemach kujawskich. *Zesz. Nauk. ATR w Bydgoszczy, Rolnictwo* 44, 23-35.
- [50] Cooke T.D., Bruland K.W., 1987. Aquatic chemistry of selenium: evidence of biomethylation. *Environ. Sci. Tech.* 21, 1214-1219.
- [51] Cooper W.J., Zepp R.G., 1990. Hydrogen peroxide decay in waters with suspended soils. Evidence for biologically mediated processes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 47, 888-893.
- [52] Davidson E., Agren G., Daniel O., Emeis K.C., Largeau C., Lee C., Mopper K., Oades J.M., Reeburgh W.S., Schimel D.S., Zepp R.G., 1995. Group Report: What are the physical, chemical, and biological processes that control the formation and degradation of nonliving organic matter. [W:] *Role of nonliving organic matter in the earth's carbon cycle*, R.G. Zepp, Ch. Sonntag (red.), Wiley, New York, 305-324.
- [53] Dąbkowska-Naskręt H., Bartkowiak A., 2001. Chemiczna specjacja cynku w profilach wybranych gleb uprawnych Kujaw. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 476, 107-115.
- [54] Dąbkowska-Naskręt H., Jaworska H., Bartkowiak A., Różański S., 2004. Stan zasobności warstwy ornej intensywnie użytkowanych gleb uprawnych Pomorza i Kujaw w wybrane pierwiastki śladowe. *Pr. Komis. Nauk Rol. Biol. BTN B* 52, 31-40.
- [55] Dębski B., 2007. Ocena poziomu występowania selenu u zwierząt w Polsce. [W:] *Selen – pierwiastek ważny dla zdrowia, fascynujący dla badacza*, M. Wierzbicka, E. Bulska, A. Pyrzyńska, I. Wysocka, B.A. Zachara (red.), Malamut, Warszawa, 103-126.
- [56] Diaz-Alarcón J.P., Navarro-Alarcón M., López-García de la Serrana H., López-Martínez M.C., 1996. Determination of selenium in cereals, legumes and dry fruits from southeastern Spain for calculation of daily dietary intake. *Sci. Tot. Environ.* 184, 183-189.
- [57] Dowdle P.R., Oremland R.S., 1998. Microbial oxidation of elemental selenium in soil slurries and bacterial cultures. *Environ. Sci. Technol.* 32 (23), 3749-3755.
- [58] Dudka S., 1992. Ocena całkowitych zawartości pierwiastków głównych i śladowych w powierzchniowej warstwie gleb Polski. *Rozprawa habilitacyjna*, Wyd. IUNG, Puławy.

- [59] Duscay L., Ložek O., 2006. Effect of selenium foliar application on its content in winter wheat grain. *Plant Soil Environ.* 52(2), 78-82.
- [60] Ekholm P., Eurola M., Venäläinen E., 2005. Selenium content of foods and diets in Finland. Proc. of Twenty years of selenium fertilization, Helsinki, Finland, 39-45.
- [61] Ellis D.E., Salt D.E., 2003. Plants, selenium and human health. *Current Opinion in Plant Biology* 6, 273-279.
- [62] Emerick J.C., De Marco L.S., 1991. Geobotanical indicator of selenium. Proc. of Billings Land Reclamation Symposium on Selenium in Arid and Semiarid Environments, Western United States, 37-41.
- [63] Eurola M., Hietaniemi V., Kontturi M., Tuuri H., Kangas A., Niskanen M., Saastamoinen M., 2004. Selenium content of Finnish oats in 1997-1999: effect of cultivars and cultivation techniques. *Agric. Food Sci.* 13, 46-53.
- [64] Fageria N.K., Baligar V.C., Clark R.B., 2002. Micronutrients in crop production. *Adv. Agron.* 77, 185-268.
- [65] Feist L.J., Parker D.R., 2001. Ecotypic variation in selenium accumulation among populations of *Stanleya pinnata*. *New Phytol.* 149, 61-69.
- [66] Fiedurek J., Szczodrak J., 1997. Katalaza – właściwości, rola fizjologiczna i zastosowanie. *Post. Mikrobiol.* XXXVI, 71-84.
- [67] Fordyce F., 2005. Selenium deficiency and toxicity in the environment. [W:] *Essentials of Medical Geology*, O. Selinus, B. Alloway, J.A. Centeno, R.B. Finkelman, R. Fuge, U. Lindh, P. Smedley (red.), Elsevier, Amsterdam, 373-415.
- [68] Frankenberger W.T. Jr., Dick W.A., 1983. Relationship between enzyme activities and microbial growth and activity indices in soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47, 945-951.
- [69] Furczak J., Szember A., Bielińska J., 1991. Aktywność enzymatyczna strefy przybrzeżnej jezior Piaseczno i Głębokie różniących się troficznością (Pojezierze Łęczyńsko-Włodawskie). *Studia Ośrodka Dokumentacji Fizjograficznej* 19, 307-324.
- [70] Gil-Sotres F., Trasar-Cepeda C., Leirós M.C., Seoane S., 2005. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil Biol. Biochem.* 37, 877-887.
- [71] Gissel-Nielsen G., 1971. Influence of pH and texture of the soil on plant uptake of added selenium. *J. Agric. Food Chem.* 19(6), 1165-1167.
- [72] Gissel-Nielsen G., 1975. Selenium concentration in Danish fodder crops. *Acta. Agric. Scand.* 25, 216-220.
- [73] Gissel-Nielsen G., 1998. Effects of selenium supplementation of field crops. [W:] *Environmental Chemistry of Selenium*, W.T. Frankenberger Jr., R.A. Engberg (red.), Marcel Dekker, New York, 99-112.
- [74] Gissel-Nielsen G., Bisbjerg B., 1970. The uptake of applied selenium from soil by plants. 2. The utilization of various selenium compounds. *Plant Soil* 32, 382-396.

- [75] 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.
- [76] Gliński J., Stępniewska Z., Brzezińska M., 1986. Characterization of the dehydrogenase and catalase activity of the soils of two natural sites with respect to the soil oxygenation status. *Polish J. Soil Sci.* 19, 47-52.
- [77] Gonet S.S., 2007. Ochrona zasobów materii organicznej gleb. [W:] Rola materii organicznej w środowisku, S.S. Gonet, M. Markiewicz (red.), PTSH, Wrocław, 7-29.
- [78] Gromadzińska J., Zachara B.A., Wąsowicz W., 2007. Selenobiałka. [W:] Selen – pierwiastek ważny dla zdrowia, fascynujący dla badacza, M. Wierzbicka, E. Bulska, A. Pyrzyńska, I. Wysocka, B.A. Zachara (red.), Malamut, Warszawa, 172-196.
- [79] Gupta U.C., Gupta S.C., 2002. Quality of animal and human life as affected by selenium management of soils and crops. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 33, 15-18.
- [80] Gustafsson J.P., Johnsson L., 1992. Selenium retention in the soil organic matter of Swedish forest soils. *J. Soil Sci.* 43, 461-472.
- [81] Guwy A.J., Martin S.R., Hawkes F.R., Hawkes D.L., 1999. Catalase activity measurements in suspended aerobic biomass and soil samples. *Enzyme Microb. Technol.* 25, 669-676.
- [82] Hadas A., Kautsky L., 1994. Feather meal, a semi-slow-release nitrogen fertilizer for organic farming. *Fertil. Res.* 38, 165-170.
- [83] Hagarova I., Žemberyova M., Bajčan D., 2005. Sequential and single step extraction procedures used for fractionation of selenium in soil samples. *Chem. Pap.* 59(2), 93-98.
- [84] Hamdy A.A., Gissel-Nielsen G., 1970. Fixation of selenium by clay minerals and iron oxides. *Z. Pflanzenernaehr. Bodenkd.* 140, 63-70.
- [85] Hamdy A.A., Gissel-Nielsen G., 1976. Relationships between soil factors and selenium content of Danish soil and plants. *Risø Report No 349*, Danish Atomic Energy Commission Research Establishment, Denmark.
- [86] Hartikainen H., 2005a. Biogeochemistry of selenium and its impact on food chain quality and human health. *J. Trace Elem. Med. Biol.* 18, 309-318.
- [87] Hartikainen H., 2005b. Occurrence and chemistry of selenium in Finnish soils. *Proc. of Twenty years of selenium fertilization*, Helsinki, Finland, 18-24.
- [88] Hartikainen H., Xue T., 1999. The promotive effect of selenium on plant growth as triggered by ultraviolet irradiation. *Environ. Qual.* 28, 1272-1275.
- [89] Hartikainen H., Xue T., Piironen V., 2000. Selenium as an anti-oxidant and pro-oxidant in ryegrass. *Plant Soil* 225, 193-200.
- [90] Hawkesford M.J., Zhao F.J., 2007. Strategies for increasing the selenium content in wheat. *J. Cereal Sci.* 46, 282-292.

- [91] Hawrot M., Nowak A., Kłódka D., 2005. Changes of dehydrogenases activity in soils polluted with diesel fuel. *Polish J. Microbiol.* 54(1), 49-53.
- [92] Haygarth P.M., 1994. Global importance and global cycling of selenium. [W:] *Selenium in the Environment*, W.T. Frankenberger Jr., S. Benson (red.), Marcel Dekker Inc., New York, 1-27.
- [93] Haygarth P.M., Cooke A.I., Jones K.C., Harrison A.F., Johnstone A.E., 1993. Long-term change in the biogeochemical cycling of atmospheric selenium: deposition to plants and soil. *J. Geophys. Res.* 98, 16769-16776.
- [94] Hesterberg D., 1998. Biogeochemical cycles and processes leading to changes in mobility of chemicals in soils. *Agric. Ecosyst. Environ.* 67, 121-133.
- [95] Huang P.M., Wang M.K., Chiu C.Y., 2005. Soil mineral-organic matter-microbe interactions: Impact on biogeochemical processes and biodiversity in soils. *Pedobiologia* 49, 609-635.
- [96] Johnson J.I., Temple K.L., 1964. Some variables affecting the measurement of catalase activity in soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 28, 207-216.
- [97] Johnsson L., 1991a. Selenium uptake by plants as a function of soil type, organic matter content and pH. *Plant Soil* 133, 57-64.
- [98] Johnsson L., 1991b. Trends and annual fluctuations in selenium concentrations in wheat grain. *Plant Soil* 138, 67-73.
- [99] Kabata-Pendias A., 1998. Geochemistry of selenium. *J. Environ. Pathol. Toxicol. Oncol.*, 17(3-4), 1-5.
- [100] Kabata-Pendias A., 1994. Biogeochemia arsenu i selenu. *Zesz. Nauk. Komitetu „Człowiek i Środowisko” PAN* 8, 9-16.
- [101] Kabata-Pendias A., Pendias H., 1979. *Pierwiastki śladowe w środowisku biologicznym*. Wyd. Geol. Warszawa.
- [102] Kabata-Pendias A., Pendias H., 1999. *Biogeochemia pierwiastków śladowych*. PWN, Warszawa.
- [103] Kalembsa S., 2003. Rolnicze wykorzystanie osadów ściekowych. [W:] *Substancje humusowe w glebach i nawozach*, S.S. Gonet, B. Dębska (red.), PTSH, Wrocław, 63-74.
- [104] Kąklewski K., Nowak J., Ligocki M., 2008. Effects of selenium content in green parts of plants on the amount of ATP and ascorbate-glutathione cycle enzyme activity at various growth stages of wheat and oilseed rape. *J. Plant Physiol.* 165(10), 1011-1022.
- [105] Kerstetter R., Zepp R.G., Carreira L.H., 1998. Peroxidases in grass dew derived from guttation: possible role in polymerization of soil organic matter. *Biogeochemistry* 42, 311-323.
- [106] Kieliszewska-Rokicka B., 2001. Enzymy glebowe i ich znaczenie w badaniach aktywności biologicznej gleby. [W:] *Drobnoustroje środowiska glebowego*, H. Dahm, A. Pokojska-Burdziej (red.), UMK, Toruń, 37-47.
- [107] Kim Y.Y., Mahan D.C., 2001. Comparative effects of high dietary levels of organic and inorganic selenium on selenium toxicity of growing-finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 79, 942-948.

- [108] Klasyfikacja uziarnienia gleb i utworów mineralnych, 2008. PTG Warszawa
- [109] Klucz do określania faz rozwojowych roślin jedno- i dwuliściennych w skali BBCH, 2005. Instytut Ochrony Roślin, Państwowa Inspekcja Ochrony Roślin i Nasiennictwa – Główny Inspektorat, Poznań, 1-134.
- [110] Kłapcińska B., Danch A., Poprzęcki S., Kimsa E., 1998. Selenium concentration in the blood of young healthy subpopulation in Northern Silesia. *Polish J. Environ. Stud.* 7, 378-379.
- [111] Kobus J., 1995. Biologiczne procesy a kształtowanie żyzności gleby. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 421a, 209-219.
- [112] Koper J., Piotrowska A., 2001. Influence of long-term fertilization on the enzymatic activity. *Acta Agrophys.* 52, 133-140.
- [113] Koper J., Piotrowska A., Siwik A., 1999. The index of soil fertility in a long-term experiment with crop-rotation and monoculture. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 465, 461-470.
- [114] Koper J., Piotrowska A., Siwik-Ziomek A., 2004. Wartość enzymatycznego wskaźnika żyzności w zależności od zróżnicowanego zmianowania i nawożenia gleby. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 501, 219-225.
- [115] Koper J., Siwik-Ziomek A., 2001. Zmiany zawartości siarki oraz aktywność dehydrogenaz glebowych w rejonie Zakładów Azotowych we Włocławku. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 476, 425-431.
- [116] Kucharski J., 1997. Relacje między aktywnością enzymów a żyznością gleby. [W:] *Drobnoustroje w środowisku występowanie, aktywność i znaczenie*, W. Barabasz (red.), Akademia Rolnicza, Kraków, 327-347.
- [117] Kuczyńska J., Biziuk M., 2007. Biogeochemia selenu i jego monitoring w materiałach biologicznych pochodzenia ludzkiego. *Ecol. Chem. Eng.* 14(S1), 47-65.
- [118] Kuprevich V., Scherbakova T.A., 1971. Comparative enzymatic activity in diverse types of soil. [W:] *Soil Biochemistry*, vol. 2, A.D. McLaren, J. Skujins (red.), Marcel Dekker, New York, 167-201.
- [119] Ladd J.N., 1978. Origin and range of enzymes in soil. [W:] *Soil Enzymes*, R.G. Burns (red.), Academic Press, New York, 51-96.
- [120] Lavado R.S., Porcelli C.A., Alvarez R., 1999. Concentration and distribution of extractable elements in soil as affected by tillage systems and fertilization. *Sci. Tot. Environ.* 232, 185-191.
- [121] Lévesque M., 1977. Some aspects of selenium relationships in Eastern Canadian soils and plants. *Can. J. Soil Sci.* 54, 205-214.
- [122] Li H.F., McGrath S.P., Zhao F.J., 2008. Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenite. *New Phytol.* 178(1), 92-102.
- [123] Lityński T., Jurkowska H., Gorlach E., 1976. *Analiza chemiczno-rolnicza*. PWN, Warszawa.

- [124] Logan T.J., Chang A.C., Page A.L., Ganje T.J., 1987. Accumulation of selenium in crops grown on sludge-treated soil. *J. Environ. Qual.* 16(4), 349-352.
- [125] Lyons G.H., Judson G.J., Ortiz-Monasterio I., Genc Y., Stangoulis J.C.R., Graham R.D., 2005a. Selenium in Australia: Selenium status and biofortification of wheat for better health. *J. Trace Elem. Med. Biol.* 19, 75-82.
- [126] Lyons G.H., Stangoulis J.C.R., Graham R.D., 2005b. Tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L.) to high soil and solution selenium levels. *Plant Soil* 270, 179-188.
- [127] Maas J., 1998. Selenium metabolism in grazing ruminants: deficiency, supplementation and environmental implication. [W:] *Environmental Chemistry of Selenium*, W.T. Frankenberger Jr., R.A. Engberg (red.), Marcel Dekker, New York, 113-128.
- [128] Maćkowiak Cz., 1994. Zasady stosowania gnojowicy. IUNG, Puławy, 1-40.
- [129] Mäkelä-Kurtto R., Sippola J., 2002. Monitoring of Finnish arable land: changes in soil quality between 1987 and 1998. *Agric. Food Sci. Finn.* 11, 273-284.
- [130] Malinowska K., Smolik B., 2006. Wpływ różnych dawek metali ciężkich na aktywność enzymów stresu oksydacyjnego oraz parametry fizjologiczne pszenicy jarej. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 515, 381-388.
- [131] Margesin R., Zimmerbauer A., Schinner F., 2000. Monitoring of bioremediation by soil biological activities. *Chemosphere* 40, 339-346.
- [132] Mayland H.F., 1994. Selenium in plants and animal nutrition. [W:] *Selenium in the Environment*, W.T. Frankenberger Jr., S. Benson (red.), Marcel Dekker Inc., New York, 29-45.
- [133] Mizuno M., Tada Y., Uchii K., Kawakami S., Mayama S., 2005. Catalase and alternative oxidase cooperatively regulate programmed cell death induced by β -glucan elicitor in potato suspension cultures. *Planta* 220, 849-853.
- [134] Munier-Lamy C., Deneux-Mustin S., Mustin C., Merlet D., Berthelin J., Leyval C., 2007. Selenium bioavailability and uptake as affected by four different plants in loamy clay soil with particular attention to mycorrhizae inoculated ryegrass. *J. Environ. Radioact.* 97, 148-158.
- [135] Myśków W., Stachyra A., Zięba S., Masiak D., 1996. Aktywność biologiczna gleby jako wskaźnik jej żyzności i urodzajności. *Rocz. Glebozn.* XLVII(1/2), 89-99.
- [136] Navarro-Alarcón M., López-Martinez M.C., 2000. Essentiality of selenium in the human body: relationship with different disease. *Sci. Tot. Environ.* 249, 347-371.
- [137] Nowak J., Kąklewski K., Kłódka D., 2002. Influence of various concentration of selenic acid (IV) on the activity of soil enzymes. *Sci. Tot. Environ.* 291, 105-110.

- [138] Nowak J., Kąklewski K., Ligocki M., 2004. Influence of selenium on oxidoreductive enzymes activity in soil and in plants. *Soil Biol. Biochem.* 36, 1553-1558.
- [139] Øgaard A.F., Sogn T.A., Eich-Greatorex S., 2007. Effect of cattle manure on selenate and selenite retention in soil. *Nutrient Cycling in Environment* 76(1), 39-64.
- [140] Opinion of the Scientific Committee on food on the tolerable upper intake level of selenium, 2000. SCF/CS/NUT/UPPLEV/25 Final, 1-18.
- [141] Papp L.V., Lu L., Holmgren A., Khanna K.K., 2007. From selenium to selenoproteins: synthesis, identity, and their role in human health. *Antioxidant and Redox Signaling* 9(7), 775-806.
- [142] Pascual J.A., Hernandez T., Garcia C., Ayuso M., 1998. Enzymatic activities in an arid soil amended with urban organic wastes: laboratory experiment. *Biores. Tech.* 64, 131-138.
- [143] Patorczyk-Pytlik B., Kulczycki G., 2009. Content of selenium in arable soils near Wrocław. *J. Elementol.* 14(4), 755-762.
- [144] Pazurkiewicz-Kocot K., Galas W., Kita A., 2003. The effect of selenium on the accumulation of some metals in *Zea mays* L. plants treated with indole-3-acetic acid. *Cell. Mol. Biol. Lett.* 8(1), 97-103.
- [145] Pennanen A., Xue T., Hartikainen H., 2002. Protective role of selenium in plant subjected to serve UV irradiation stress. *J. Appl. Bot.* 76, 66-76.
- [146] Piatak N.M., Seal R.R., Sanzolone R.F., Lamothe P.J., Brown Z.A., 2006. Preliminary results of sequential extraction experiment for selenium on mine waste and stream sediments from Vermont, Maine, and New Zealand. U.S. Geological Survey Open-File Report 2006, 1184, 1-21.
- [147] Piotrowska M., 1984. Zawartość selenu w uprawnych glebach Polski. *Rocz. Glebozn.* 35, 24-31.
- [148] Piotrowska-Cyplik A., Cyplik P., Czarnecki Z., 2007. Pomiar aktywności dehydrogenaz a tradycyjna metoda oznaczania liczby mikroorganizmów jako wskaźnika aktywności mikrobiologicznej kompostu z komunalnego osadu ściekowego. *J. Res. Appl. Agric. Eng.* 52(4), 22-26.
- [149] Poggi V., Arcioni A., Filippini P., Pifferi P.G., 2000. Foliar application of selenite and selenate to potato (*Solanum tuberosum*): effect of a ligand agent on selenium content of tubers. *J. Agric. Food Chem.* 48(10), 4749-4751.
- [150] Poprzęcki S., Kłapcińska B., Danch A., 2007. Zawartość selenu we krwi mieszkańców południowej Polski. Rozmieszczenie selenu w glebach. [W:] Selen – pierwiastek ważny dla zdrowia, fascynujący dla badacza, M. Wierzbicka, E. Bulska, A. Pyrżyńska, I. Wysocka, B.A. Zachara (red.) Malamut, Warszawa, 197-205.
- [151] Prasad K., Saradhi P.P., Sharmila P., 1999. Concerted action of antioxidant enzymes and curtailed growth under zinc toxicity in *Brassica juncea*. *Environ. Exp. Botany* 42, 1-10.

- [152] Praveen-Kumar, Tarafdar J.C., 2003. 2,3,5-Triphenyltetrazolium chloride (TTC) as a electron acceptor of culturable soil bacteria, fungi and actinomycetes. *Biol. Fertil. Soils* 38, 186-189.
- [153] Pyrżyńska K., 2002. Determination of selenium species in environmental samples. *Microchim. Acta* 140, 55-62.
- [154] Pyrżyńska K., 2007. Występowanie selenu w środowisku. [W:] Selen – pierwiastek ważny dla zdrowia, fascynujący dla badacza, M. Wierzbicka, E. Bulska, A. Pyrżyńska, I. Wysocka, B.A. Zachara (red.), Malamut, Warszawa, 25-30.
- [155] Raczuk J., Tkaczuk C., 2003. Fosfor, żelazo oraz pierwiastki śladowe w poziomach próchnicznych gleb ornych Polski Wschodniej oraz wybranych krajów Europy. [W:] Obieg pierwiastków w przyrodzie, cz. II, B. Gwożdek, J. Misiak (red.), Wyd. IOŚ, Warszawa, 215-219.
- [156] Rayman M.P., 2000. The importance of selenium to human health. *Lancet* 356, 233-241.
- [157] Regalado C., García-Almendárez B.E., Duarte-Vázquez M.A., 2004. Biotechnological applications of peroxidases. *Phytochem. Rev.* 3, 243-256.
- [158] Ross D.J., 1971. Some factors influencing the estimation of dehydrogenase activities of some soils under pasture. *Soil Biol. Biochem.* 3, 97-110.
- [159] Roussel-Debet S., Deneux-Mustin S., Munier-Lamy C., 2005. Screening the importance of soil micro-organisms on radionuclides mobility. *Radio-protection* 40, S87-S91.
- [160] Russel S., 1974. *Drobnoustroje a życie gleby*. PWN, Warszawa.
- [161] Russel S., 2005. Znaczenie badań enzymów w środowisku glebowym. *Acta Agrophys., Rozprawy i Monografie* 3, 5-9.
- [162] Sager M., 1999. Selenium – occurrence and cycling in agricultural matrices. *GeoMedicine Seminar, Vienna-Baden*, 48-51.
- [163] Sager M., 2007. Trace and nutrient elements in manure, dung and compost samples in Austria. *Soil Biol. Biochem.* 39(6), 1383-1390.
- [164] Sèby F., Gautier M.P. Lespès G., Astruc M. 1997. Selenium speciation in soils after alkaline extraction. *Sci. Tot. Environ.* 207, 81-90.
- [165] Serban A., Nissenbaum A., 1986. Humic acid association with peroxidase and catalase. *Soil Biol. Biochem.* 18, 41-44.
- [166] Seppänen M., Turakainen M., Hartikainen H., 2003. Selenium effect on oxidative stress in potato. *Plant Science* 165, 311-319.
- [167] 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.
- [168] Sharmasarkar S., Vance G.F., 1994. Application of partial fractionation and speciation techniques for predicting ground water contamination by soil selenium movement. *Proc. Effects of Human-induced Changes on Hydrologic Systems*, AWRA, Jackson Hole, Wyoming, 1055-1062.
- [169] Sharmasarkar S., Vance G.F., 2002. Selenite-selenate sorption in surface coal mine environment. *Adv. Environ. Res.* 7, 87-95.

- [170] Smolik B., Malinowska K., 2006. Wpływ różnych dawek metali ciężkich na aktywność enzymów stresu oksydacyjnego oraz parametry fizjologiczne pszenicy jarej. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 515, 371-379.
- [171] Sors T.G., Ellis D.R., Salt D.E., 2005. Selenium uptake, translocation, assimilation and metabolic fate in plants. *Photosynthesis Res.* 86, 373-389.
- [172] Spychaj-Fabisiak E., Smoliński S., 2004. Wpływ zróżnicowanego nawożenia azotem i symulowanego kwaśnego opadu na aktywność enzymatyczną badanych gleb. *Ann. Univ. Mariae Curie-Skłodowska, Sect. E Agricultura LIX(3)*, 1415-1420.
- [173] Stadlober M., Sager M., Irgolic K.J., 2001. Effects of selenate supplemented fertilisation on the selenium level of cereals – identification and quantification of selenium compounds by HPLC-ICP-MS. *Food Chem.* 73, 357-366.
- [174] Stadtmann T.C., 1990. Selenium biochemistry. *Anu. Rev. Biochem.* 59, 111-127.
- [175] Systematyka gleb Polski, 1989. *Rocz. Glebozn.* XL(3/4), PWN, Warszawa.
- [176] Szymańska M., Hawrylak B., 2007. Selen w roślinach. [W:] Selen – pierwiastek ważny dla zdrowia, fascynujący dla badacza, M. Wierzbicka, E. Bulska, A. Pyrżyńska, I. Wysocka, B.A. Zachara (red.), Malamut, Warszawa, 69-87.
- [177] Tan J., Zhu W., Wang W., Li R., Hou S., Wang D., Yang L., 2002. Selenium in soil and endemic diseases in China. *Sci. Tot. Environ.* 284, 227-235.
- [178] Tapiero H., Townsend D.M., Tew K.D., 2003. The antioxidant role of selenium and seleno-compounds. *Biomed. Pharmacother.* 57, 134-144.
- [179] Terry N., Zayed A.M., de Souza M.P., Tarun A.S., 2000. Selenium in higher plants. *Annu. Rev. Plant Mol. Bioch.* 51, 401-432.
- [180] Tessier A., Cambell P.G.C., Bisson M., 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Anal. Chem.* 51, 844-851.
- [181] Trasar-Cepeda C., Camiña F., Leirós M.C., Gil-Sotres F., 1999. An improved method to measure catalase activity in soil. *Soil Biol. Biochem.* 31, 483-485.
- [182] Turakainen M., 2007. Selenium and its effects on growth, yield and tuber quality in potato. Academic Dissertation, University of Helsinki, Finland.
- [183] Turakainen M., Hartikainen H., Seppänen M., 2004. Effects of selenium supplied on potato growth and concentrations of soluble sugars and starch. *J. Agric. Food Chem.* 52, 5378-5382.
- [184] Wachowicz B., 1993. Selen w roślinach. *Wiad. Bot.* 37, 87-89.
- [185] Wang M.C., Chen H.M., 2003. Forms and distribution of selenium at different depths and among particle size fractions of three Taiwan soils. *Chemosphere* 52, 585-593.
- [186] Wang Z., Gao Y., 2001. Biogeochemical cycling of selenium in Chinese environments. *Applied Geochemistry* 16, 1345-1351.

- [187] Watkinson J.H., 1966. Fluorometric determination of selenium in biological material with 2,3-diaminonaphthalene. *Anal. Chem.* 38, 92-97.
- [188] Wąsowicz W., Gromadzińska J., Rydzyński K., Tomczak J., 2003. Selenium status of low-selenium area residents: Polish experiences. *Toxicology Letters* 137, 95-101.
- [189] Wąsowicz W., Gromadzińska J., Zachara B.A., Reszka E., 2007. Rola selenu w rozwoju nowotworów złośliwych. [W:] Selen – pierwiastek ważny dla zdrowia, fascynujący dla badacza, M. Wierzbicka, E. Bulska, A. Pyrżyńska, I. Wysocka, B.A. Zachara (red.), Malamut, Warszawa, 147-171.
- [190] Whanger P.D., 2002. Selenocompounds in plants and animals and their biological significance. *J. Am. Coll. Nutr.* 21(3), 223-232.
- [191] Whelan B.R., 1993. Effects of barium selenate fertilizer on the concentration of barium in pasture and sheep tissues. *J. Agric. Food Chem.* 41, 768-770.
- [192] Wierzbicka M., Dutkiewicz J., Wysocka I., Bulska E., Janssens K., 2007. Biotransformacja selenu w roślinach. [W:] Selen – pierwiastek ważny dla zdrowia, fascynujący dla badacza, M. Wierzbicka, E. Bulska, A. Pyrżyńska, I. Wysocka, B.A. Zachara (red.), Malamut, Warszawa, 88-102.
- [193] Włodarczyk T., 2000. Some aspects of dehydrogenase activity in soils. *Int. Agrophys.* 14, 365-376.
- [194] Włodarczyk T., Stępniewski W., Brzezińska M., 2002. Dehydrogenase activity, redox potential, and emission of carbon dioxide and nitrous oxide from Cambisols under flooding conditions. *Biol. Fertil. Soils* 36, 200-206.
- [195] Wu L., Låg J., 1988. Selenium in Norwegian farmland soils. *Acta Agric. Scan.* 38, 271-276.
- [196] Varo P., 1993. Selenium fertilization in Finland: selenium content in feed and foods. *Norw. J. Agric. Suppl.* 11, 152-158.
- [197] Varo P., Alfthan G., Ekholm P., Aro A., Koivistoinen P., 1988. Selenium intake and serum selenium in Finland: effects of soil fertilization with selenium. *Am. J. Clin. Nutr.* 48, 324-329.
- [198] Venäläinen E-R., Hirvi T., Hirn J., 1997. Effect of selenium supplementation on the selenium content in muscle and liver of Finnish pigs and cattle. *J. Agric. Food Chem.* 50, 5722-5728.
- [199] Ylärinta T., 1983. Selenium in Finnish agricultural soils. *Ann. Agric. Fenn.* 22, 122-136.
- [200] Ylärinta T., 1985. Increasing the selenium content of cereal and grass crops in Finland. *Academic Dissertation, University of Helsinki, Finland.*
- [201] Ylärinta T., 1990. The selenium content of some agricultural crops and soils before and after the addition of selenium to fertilizers in Finland. *Ann. Agric. Fenn.* 29, 131-139.
- [202] Zabłocki Z., 1990. Selen w glebach i roślinach Pomorza Zachodniego. *Rozprawa habilitacyjna, Wyd. AR, Szczecin.*

- [203] Zachara B.A., Dobrzyński W., Trafikowska U., Szymański W., 2001. Blood selenium and glutathione peroxidases in miscarriage. *Br. J. Obstet. Gynaecol.* 108, 244-247.
- [204] Zachara B.A., Gromadzińska J., Wąsowicz W., 2007. Rola selenu w fizjologii i niektórych stanach patologicznych. [W:] Selen – pierwiastek ważny dla zdrowia, fascynujący dla badacza, M. Wierzbicka, E. Bulska, A. Pyrzyńska, I. Wysocka, B.A. Zachara (red.), Malamut, Warszawa, 147-171.
- [205] Zachara B.A., Wąsowicz W., 1994. Stężenie selenu w składowych częściach krwi subpopulacji polskiej na tle innych krajów. [W:] Arsen i selen w środowisku – problemy ekologiczne i metodyczne. *Zesz. Nauk. „Człowiek i Środowisko” PAN* 8, 157-166.
- [206] Zepp R.G., Skurlatov Y.I., Ritmiller L.F., 1988. Effects of aquatic humic substances on analysis for hydrogen peroxide using peroxidase catalyzed oxidations of triarylmethanes or hydroxyphenylacetic acid. *Environ. Technol. Lett.* 9, 287-298.
- [207] Zhao C., Ren J., Xue C., Lin E., 2005. Study on the relationship between soil selenium and plant selenium uptake. *Plant Soil* 277, 197-206.
- [208] Zwiagincew D.G., 1980. *Metody poczwiennej mikrobiologii i biochemii.* Izdatielstwo Moskowskovo Uniwersiteta, Moskwa.
- [209] Zwolak I., Zaporowska H., 2005. Rola selenu oraz wybranych Se-białek w organizmie człowieka. *Ann. Univ. Mariae Curie-Skłodowska, Sect. D, LX, Suppl. XVI*, 457-460.

SELEN W GLEBIE I ROŚLINACH W WARUNKACH ZRÓŻNICOWANEGO NAWOŻENIA ORGANICZNEGO I MINERALNEGO

Streszczenie

Przeprowadzono badania mające na celu określenie wpływu nawożenia zróżnicowanymi dawkami obornika bydłęcego i azotu na zawartość selenu w glebie, a także jego nagromadzenia w częściach konsumpcyjnych oraz częściach nadziemnych i korzeniach roślin. Dla określenia mobilności selenu w środowisku glebowym oraz jego przyswajalności przez rośliny oznaczono zawartość kilku frakcji selenu za pomocą analizy sekwencyjnej. Celem pracy było także określenie zmian aktywności wybranych enzymów uczestniczących w przemianach oksydoredukcyjnych w glebie w zależności od zastosowanych dawek nawozów w trakcie okresu wegetacyjnego.

Badania zrealizowano na bazie wieloletniego doświadczenia polowego prowadzonego przez IUNG w Puławach. Założono je na glebie płowej typowej, z następującym doбором roślin w zmianowaniu: ziemniak – pszenica ozima – jęczmień jary – kukurydza. Glebę nawożono obornikiem pod ziemniaki w dawkach 20, 40, 60 i 80 t·ha⁻¹ świeżej masy oraz azotem w formie saletry amonowej na poziomie 45, 90 i 135 kg N·ha⁻¹ pod ziemniaki i kukurydzę, a także 40, 80 i 120 kg N·ha⁻¹ pod pszenicę ozimą i jęczmień jary.

Zawartość selenu w glebie płowej, nie nawożonej obornikiem, kształtowała się w okresie badawczym na bardzo niskim poziomie (0,077-0,108 mg·kg⁻¹). Zastosowanie obornika zwiększyło zawartość selenu ogółem w glebie, nie wykazano natomiast jednoznacznego wpływu azotu w tym zakresie. Zawartość tego mikroelementu w całym okresie badawczym zależała od ilości węgla w związkach organicznych i azotu w glebie. W warunkach prowadzonych badań zawartość wszystkich badanych frakcji selenu wzrastała na ogół wraz ze wzrostem dawki obornika. Średnie zawartości poszczególnych frakcji selenu i ich udział w zawartości selenu ogółem w glebie układały się w następującym szeregu: selen związany z substancją organiczną (SeFIV) > selen związany z tlenkami metali (SeFIII) > seleniany(IV) (SeFII) > seleniany(VI) (SeFI) > selen frakcji rezydualnej (SeFV). W glebie, zwłaszcza pod uprawą ziemniaka i pszenicy ozimej, dominowała frakcja skompleksowana z materią organiczną, a jej udział w całkowitej puli selenu wynosił ponad 30%. Udział fitodostępnych frakcji selenu (SeFI i SeFII) stanowił od 25 do 48% całkowitej zawartości selenu glebowego i obniżał się na ogół wraz ze zwiększaniem dawki wprowadzonego do gleby obornika. Aktywność enzymatyczna gleby wykazywała wyraźną zmienność sezonową oraz znaczne fluktuacje, zależne od warunków pogodowych, dostępności substratu, a także od gatunku rośliny uprawianej w zmianowaniu. Nawożenie obornikiem wyraźnie stymulowało aktywność badanych oksydoreduktaz glebowych wraz ze wzrostem zastosowanych dawek, nie wykazano natomiast jednoznacznego wpływu azotu w tym zakresie. Stwierdzono ścisłą zależność między aktywnością en-

zymatyczną a zawartością w niej selenu ogółem. Aktywność enzymatyczna gleby była ściśle związana z zawartością w niej przyswajalnych dla roślin frakcji selenu tylko w pierwszym roku po zastosowaniu obornika, a z frakcją skompleksowaną z substancją organiczną – aż przez 3 lata. W miarę upływu czasu zależności te ulegały osłabieniu, co prawdopodobnie było związane z wyczerpywaniem się dostępnej dla mikroorganizmów substancji organicznej.

W warunkach prowadzonych badań nawożenie obornikiem spowodowało wzrost zawartości selenu w częściach nadziemnych badanych gatunków roślin. Najwięcej tego pierwiastka zgromadziły na ogół rośliny nawożone obornikiem w dawce $40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Stosowany w doświadczeniach azot zwiększał kumulację selenu w częściach nadziemnych roślin tylko we wczesnych fazach rozwojowych. W początkowym okresie wegetacji zawartość selenu w korzeniach roślin wzrastała wraz ze zwiększaniem dawki obornika, natomiast w miarę postępu wegetacji wpływ ten obserwowano tylko do dawki $60 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Zawartość selenu w korzeniach roślin (oprócz jęczmienia jarego) zwiększała się także pod wpływem wzrastających dawek azotu. W większości przypadków zawartość tego pierwiastka w korzeniach roślin w największym stopniu skorelowana była z zawartością selenu ogółem oraz jego formami przyswajalnymi dla roślin – selenianami(VI) i selenianami(IV). W miarę upływu czasu i wyczerpywania się zapasów tego pierwiastka w glebie związki między jego zawartością w glebie i roślinach były wyraźnie słabsze.

W warunkach przeprowadzonych badań mobilność selenu z roztworu glebowego do badanych części ziemniaka i kukurydzy obniżała się wraz ze wzrostem dawki obornika. Współczynniki bioakumulacji dla pszenicy ozimej oraz jęczmienia jarego wskazują, że selen na ogół najłatwiej przemieszczał się z gleby na obiektach nawiezionych 20 i $40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ obornika; dalsze zwiększanie dawek tego nawozu obniżyło jego mobilność. Translokacja selenu z korzeni do części nadziemnych roślin obniżała się na ogół wraz ze zwiększaniem ilości wprowadzonego do gleby obornika. Spowodowane to było prawdopodobnie szybszym przekształcaniem selenianów(IV) do form organicznych tego pierwiastka, zatrzymywanych w korzeniach, co w konsekwencji mogło ograniczać przemieszczanie się selenu do części nadziemnych roślin.

Nawożenie obornikiem do poziomu $40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ zwiększało zawartość selenu w bulwach ziemniaka i ziarnie kukurydzy, a w ziarnie pszenicy ozimej i jęczmienia jarego wzrost ten wykazano również po zastosowaniu $60 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ tego nawozu. Stosowany azot na tle dawek obornika zmniejszał zawartość selenu w bulwach ziemniaka, ziarnie pszenicy i jęczmienia, nie decydował natomiast o gromadzeniu tego pierwiastka w ziarnie kukurydzy.

Wyniki przeprowadzonych badań świadczą o tym, że dla uzyskania plonu roślin uprawnych o zawartościach selenu zbliżonych do wartości optymalnych, wskazane byłoby uzupełnienie nawożenia selenem w formie selenianu(IV) lub selenianu(VI), zwłaszcza w trzecim i czwartym roku po aplikacji obornika, co zapewni skuteczne i bezpieczne podwyższenie poziomu tego pierwiastka w łańcuchu troficznym.

SELENIUM IN SOIL AND PLANTS UNDER CONDITIONS OF DIFFERENT ORGANIC AND MINERAL FERTILIZATION

Summary

The objective of the study was to evaluate the effects of different doses of farmyard cattle manure (FYM) and nitrogen on the total selenium content in soil and the accumulation of selenium in the main crop and above-ground parts and roots of the plants investigated. In order to assess selenium mobility in the soil environment and its phytoavailability, the selenium content in particular fractions was determined with the technique of sequential partial dissolution. The aim of the study was to determine the changes of some oxidoreductases activity in soil in relation to the doses of fertilizers applied over vegetation period.

The experiment was carried out with the crop rotation system: potato – winter wheat – spring barley and maize. The soil was fertilized with FYM under potato in the doses of 20, 40, 60 and 80 t·ha⁻¹ and with nitrogen in the doses of 45, 90 and 135 kg N·ha⁻¹ under potato and maize and 40, 80 and 120 kg N·ha⁻¹ under winter wheat and spring barley.

Over the investigation period total selenium content in Luvisol without FYM was relatively low. The application of FYM increased the total selenium content in soil along with increasing doses of manure, but nitrogen fertilization affected total selenium content in the soil investigated in an unclear way. Statistical analysis demonstrated a significant dependence between total selenium content and organic carbon and total nitrogen contents in soil.

The selenium content in the separated fractions, as well as its share in the total selenium content in soil, determined with the fertilization applied (mean for FYM and nitrogen doses) was as follows: selenium associated with humified organic matter (SeFIV) > selenium associated with metal oxides (SeFIII) > selenite (SeFII) > selenate (SeFI) > selenium in the residuum (SeFV). The major fraction of selenium in soil, especially under potato and winter wheat, was the one associated with humified organic matter (SeFIV). Its share in the total selenium content was above 30% and increased with increasing doses of FYM. The share of phytoavailable fractions of selenium in soil (SeFI and SeFII) ranged from 25 to 48% of total soil selenium and decreased with increasing doses of manure.

The soil enzymatic activity demonstrated clear seasonal variations and considerable fluctuations depending on climatic conditions, availability of substrate and plant species in crop rotation. Manure application strongly stimulated soil oxidoreductases activity with increasing doses of manure, however the effect of nitrogen fertilization on the enzymatic activity was unclear. A strong and highly significant dependence was found between the enzymatic activity and total selenium content in soil.

In the first year after manuring, the content of phytoavailable fraction of selenium in soil significantly depended on the soil enzymatic activity. A signifi-

cant effect of the soil oxidoreductases investigated on the selenium associated with organic matter in soil was found also over the period of three years after manuring.

The selenium content in above-ground parts of the plant species investigated was affected by the FYM application. In general, the highest contents of selenium were accumulated by plants fertilized with manure at the dose of $40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Nitrogen fertilization also increased the selenium content in above-ground of the plants under study only in the early stages of the development. At the beginning of vegetation, the selenium content in roots increased with increasing doses of manure, but at the end of the vegetation period this dependence was observed only up to the dose of $60 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ of manure. The selenium content in roots (except spring barley) also increased with increasing doses of nitrogen. In general, a strict correlation was shown between selenium content in roots of the plants investigated and total selenium, selenate and selenite contents in soil.

The mobility of selenium from soil solution to the parts of plants under study decreased with increasing doses of FYM. Bioaccumulation coefficients for winter wheat and spring barley indicated that selenium more easily displaced when the doses of 20 and $40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ of FYM were applied, but further enhanced of FYM decreased the selenium mobility from soil to plants. Generally, the translocation of selenium from roots to above-ground parts of plants decreased with increasing doses of FYM, which must have been due to more rapid transformation of selenite to organic forms of selenium, retained in roots, and thus the transport of selenium from roots to aerial parts was limited.

The use of manure in the different way influenced the selenium content in the edible parts of the plants. The accumulation of this microelement in potato tubers and maize grain increased with increasing doses of manure up to the level of $40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ and in wheat and barley grain up to the dose of $60 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ of manure. The nitrogen application decreased the selenium content in potato tubers and wheat and barley grain, however there was no influence of nitrogen on the selenium content in maize grain. The correlation analysis of the results of selenium concentrations in the grains of cereals and the total selenium content in soil demonstrated a significant relationship between this parameters.

The investigations clearly indicated that in order to harvest the crop of cultivable plants of selenium content close to the optimum, a supplementation with this element in forms of selenate or selenite should be highly recommended, especially in the third and fourth year after manuring. This treatment should secure an effective and safe elevation of the level of this element in the trophic chain.