

**ELŻBIETA J. BIELIŃSKA, BARBARA FUTA, STANISŁAW BARAN,  
GRAŻYNA ŻUKOWSKA, HERONIM OLENDEREK**

## **Enzymy glebowe jako bioindykatory jakości i zdrowotności gleb leśnych w obszarze oddziaływania Zakładów Azotowych „Puławy” S.A.\***

Soils enzymes as bio-indicators of forest soils health and quality within  
the range of impact of Zakłady Azotowe ‘Puławy’ S.A.

### **ABSTRACT**

Bielińska E. J., Futa B., Baran S., Żukowska G., Olenderek H. 2015. Enzymy glebowe jako bioindykatory jakości i zdrowotności gleb leśnych w obszarze oddziaływania Zakładów Azotowych „Puławy” S.A. Sylwan 159 (11): 921-930.

The aim of the study was to specify the direction and dynamics of changes occurring in forest soils in the area affected by Zakłady Azotowe ‘Puławy’ S.A. (nitrogen plant) on the basis of the activity of soil enzymes catalysing the key processes in the conversion of organic matter. The study involved examining the rhizosphere and non-rhizosphere soils in the monitoring plots, which consisted of Scots pine plantations mixed with birch and oak trees located within a medium forest damage zone (9, 15 and 17 km north-east from the plant) in the Puławy Forest District (eastern Poland). The research work was carried out in the years 2009-2013. Dehydrogenase, acid phosphatase, urease, and protease were determined along with selected chemical soil properties (pH and organic carbon content). The activity of studied enzymes and organic carbon content in the analysed soils significantly increased with increasing distance from the nitrogen plant. It was significantly higher inside than outside the rhizosphere. The observed biological activity of soils in the rhizosphere indicated that it formed a buffering system for environmental stressors, including those reaching the soils affected by industrial emissions. The soil of natural forest ecosystems with significantly higher organic carbon content than the remaining studied soils was characterised by the highest activity of all the enzymes observed during the monitoring period. The experimental plots were shown to have the highest activity of the analysed enzymes and the highest organic carbon content in the soil under the pine stands, and the lowest in the soil under the oak stands. The stability of the biochemical processes occurring in the selected experimental plots during the 5-year monitoring period and the clear tendency for the increasing activity of the analysed enzymes and organic carbon content over the study years indicate that the introduction of populations of pine mixed with birch and oak along the lines of the prevailing wind directions may improve the chemical and ecological state of forest soils in the area affected by the activity of the nitrogen source.

### **KEY WORDS**

rhizosphere, enzymatic activity, revitalisation, nitrogen

### **ADDRESSES**

Elżbieta J. Bielińska – e-mail: elzbieta.bielinska@up.lublin.pl  
Barbara Futa, Stanisław Baran, Grażyna Żukowska, Heronim Olenderek

\*Praca finansowana częściowo ze środków projektu MNiSW N N305 12523.

Instytut Gleboznawstwa, Inżynierii i Kształtowania Środowiska, Uniwersytet Przyrodniczy;  
ul. Leszczyńskiego 7, 20-069 Lublin

## Wstęp

Gleba odgrywa podstawową rolę w kształtowaniu warunków egzystencji ekosystemów leśnych [Kowalkowski 1999; Brożek i in. 2007, 2011; Bielińska i in. 2008; Sewerniak 2012a, b; Sewerniak, Piernik 2012]. Enzymy glebowe – katalizatory wielu ważnych procesów glebowych, np. szlaku biosyntezy i rozkładu próchnicy glebowej – decydują o jakości i zdrowotności gleb [Bielińska i in. 2014]. Zastosowanie testów enzymatycznych w monitoringu gleb leśnych, prowadzonym na stałych powierzchniach obserwacyjnych, ułatwia poznanie czynników kształtujących dynamikę i kierunki zmian w ekosystemie, a także może dostarczyć gospodarce leśnej wskazówek dla utrzymania integralności stanu lasów na terenach zagrożonych [Januszek 1999; Domżał, Bielińska 2007; Bielińska i in. 2008; Lasota 2013]. Procesy biochemiczne zachodzące w glebie ryzosferowej odgrywają ważną strukturalną i funkcjonalną rolę w dynamice cyklu odżywczego roślin i mogą w istotny sposób wpływać na ich wzrost i rozwój [Pietr i in. 2002]. Zmiany aktywności enzymów glebowych w strefie ryzosferowej odzwierciedlają zaburzenia środowiska oddziałujące zarówno na glebę, jak i rośliny [Bielińska, Kołodziej 2009].

Antropogeniczne zniekształcenia gleb leśnych na terenie Lubelszczyzny występują lokalnie, głównie w rejonie oddziaływania Zakładów Azotowych „Puławy” S.A., na terenie Nadleśnictwa Puławy. Wybudowane w latach 60. XX wieku Zakłady Azotowe zlokalizowano w centrum kompleksu leśnego o łącznej powierzchni 3500 ha, na prawym brzegu środkowej Wisły, w północnej części Puław (51°25'N; 21°57'E). Brak wyposażenia w urządzenia redukujące zanieczyszczenia wprowadzane do powietrza przez kombinat, przy jednoczesnym poborze znacznych ilości wód podziemnych, doprowadził do degradacji gleb i klęski ekologicznej na dużych obszarach leśnych [Kowalkowski i in. 1999; Siuta 2002; Kopron 2007]. Szczególnie intensywne tempo zniszczeń lasu zaznacza się w kierunku dominujących wiatrów, na linii migracji skażonego przez emisje powietrza [Kopron 2007]. Pomimo zmniejszenia emisji zanieczyszczeń przemysłowych przez Zakłady Azotowe „Puławy” S.A. po roku 1995, kombinat ma nadal największy w skali województwa udział w zanieczyszczaniu powietrza atmosferycznego. Emisja zanieczyszczeń wprowadzanych do powietrza przez Zakłady Azotowe „Puławy” w stosunku do emisji z województwa lubelskiego wynosi około 40% [Ochrona... 2012].

Celem niniejszej pracy jest próba określenia kierunku i dynamiki zmian zachodzących w glebach leśnych w obszarze oddziaływania Zakładów Azotowych „Puławy” S.A. na podstawie aktywności enzymów glebowych katalizujących najważniejsze procesy przemiany substancji organicznej.

## Materiał i metody

Obiektem badań były gleby strefy ryzosferowej i pozaryzosferowej drzew w uprawach sosnowych z brzozą i dębem, zlokalizowanych na terenie Nadleśnictwa Puławy. Uprawy założono w latach 1997-1998 [Kopron 2007]. Prace badawcze prowadzono w latach 2009-2013 na wyznaczonych w obrębie tych upraw powierzchniach obserwacyjnych. Założono je na północny wschód od zakładów, czyli na przedłużeniu dominującego kierunku wiatru w odległości: 9, 15 i 17 km w strefie średnich (II) zniszczeń lasu. Powierzchnie kontrolne zlokalizowano poza zasięgiem, w niezniszczonych przez emisje azotowe drzewostanach sosnowych III klasy wieku (około 60-letnich). Powierzchnie kontrolne o podobnych cechach profilowych wytypowano na podstawie

analizy map glebowych oraz opisanie profili glebowych, w możliwie najbliższym sąsiedztwie powierzchni doświadczalnych, tj. w odległości od 0,5 do 1,0 km. Wszystkie badane powierzchnie położone są na równinnym płaskim terenie, w warunkach siedliska BMśw.

Na badanym obszarze występują asocjacje gleb autogenicznych bielicoziemnych, wytworzonych z różnej miąższości piasków eolicznych zalegających na piaskach fluwioglacjalnych w podłożu. Gleby na powierzchniach objętych badaniami są klasyfikowane jako gleby rdzawe oraz bielcowe [Klasyfikacja... 2000]. Dominującym gatunkiem lasotwórczym jest sosna (68%), choć ważną rolę w drzewostanach odgrywają też dąb (17%), brzoza (9%) i olsza (5%) [Ochrona... 2012].

Warunki hydrologiczne Nadleśnictwa Puławy są niekorzystne i mają negatywny wpływ na drzewostany rosnące na ubogich i suchych siedliskach borowych [Kopron 2007]. Na terenie Nadleśnictwa dominują cechy klimatu kontynentalnego [Kaszewski 2008], co potwierdzają dane meteorologiczne (1871-2013) uzyskane z Zakładu Agrometeorologii i Zastosowań Informatyki IUNG w Puławach, pochodzące ze Stacji Doświadczalnej Puławy-Osiny: średnia roczna temperatura powietrza 7,7°C, średnia temperatura powietrza okresu wegetacyjnego (IV-X) 14,0°C, roczna suma opadów 586 mm, suma opadów okresu wegetacyjnego (IV-X) 411 mm.

Z powierzchni doświadczalnych próbki glebowe do badań laboratoryjnych pobierano z ryzosfery i strefy pozaryzosferowej w młodnikach sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.), dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.) i brzozy brodawkowatej (*Betula pendula* Roth), we wrześniu każdego roku (2009-2013). W przypadku obiektów kontrolnych próbki gleby pobierano z ryzosfery i strefy pozaryzosferowej sosny zwyczajnej. Na wytypowanych powierzchniach próbki gleby ryzosferowej (R) pobierano z pięciu losowo wybranych roślin, z poziomu próchnicznego gleby (z głębokości 2-7 cm), według metodyki opracowanej przez Tarafđara i Jungka [1987]. Jednocześnie z tego samego poziomu pobierano glebę pozaryzosferową (N). Próbki indywidualne uśredniano w obrębie poszczególnych powierzchni obserwacyjnych i wykonywano w nich oznaczenia w trzech powtórzeniach. Określono aktywność 4 enzymów glebowych: dehydrogenaz [Thalmann 1968], fosfatazy kwaśnej [Tabatabai, Bremner 1969], ureazy [Zantua, Bremner 1975] i proteazy [Ladd, Butler 1972] oraz wybrane właściwości chemiczne gleb: pH w 1 mol KCl/dm<sup>3</sup> – potencjometrycznie i zawartość węgla organicznego – aparatem LECO 2000 CNS. Oznaczenia właściwości chemicznych wykonano według metodyki przyjętej w opracowaniach gleboznawczych [Mocek, Drzymała 2010].

Uzyskane wyniki poddano ocenie statystycznej. Wyznaczono najmniejsze istotne statystycznie różnice między otrzymanymi rezultatami dla wszystkich obiektów oraz oddzielnie dla ryzosfery i pozostałej gleby. Zależności między aktywnością enzymów glebowych i zawartością węgla organicznego w badanych glebach oceniono na podstawie obliczonych wartości współczynnika korelacji liniowej.

## Wyniki i dyskusja

W okresie prowadzonych badań monitorowane gleby charakteryzowały się odczynem bardzo kwaśnym, z pH w 1 mol KCl/dm<sup>3</sup> w zakresie od 2,8 do 4,4 (tab. 1). Istotny udział w zakwaszaniu gleb leśnych (powstałych z utworów ubogich w kationy zasadowe) mają procesy fizyczne i chemiczne uczestniczące w wietrzeniu minerałów oraz procesy biologiczne związane z cyklami krążenia C i N [Kurek 2002]. Ponadto w glebach leśnych obniżenie pH powodują kwaśne depozycje, biologiczne zakwaszenie i wymywanie składników zasadowych. Produkcja biomasy w lasach wiąże się z reguły z pobieraniem większej ilości składników pokarmowych w formie kationowej niż anionowej i uwalnianiem do gleby jonów wodorowych. Rośnie też rozpuszczalność mineral-

Tabela 1.

Zakres pH w KCl w ryzosferze (R) i poza nią (N) gleb pod drzewostanami różnych gatunków w poszczególnych obiektach badawczych w latach 2009-2013 (1-9 km, 2-15 km, 3-17 km od Zakładów Azotowych „Puławy” S.A.)

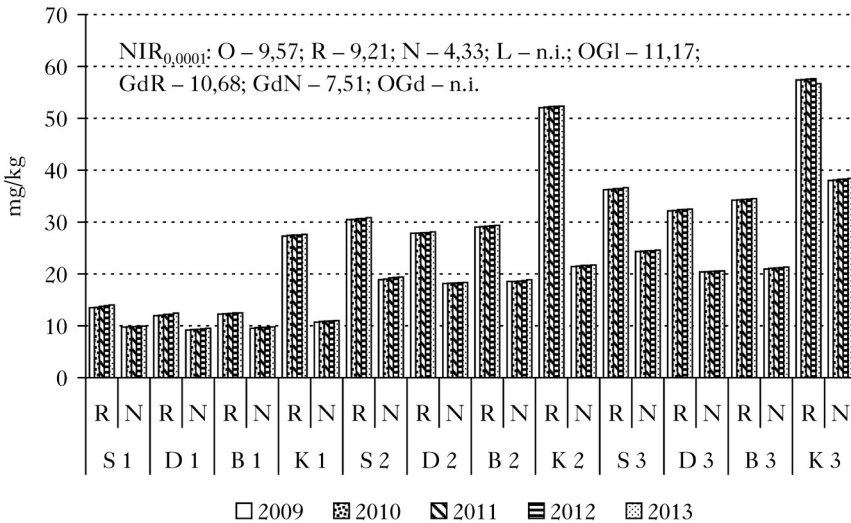
Range of pH in KCl in rhizosphere (R) and outside it (N) in soils under stands of various species in individual study sites in years 2009-2013 (1-9 km, 2-15 km, 3-17 km from 'Puławy' Nitrogen Plant)

|                         |   | 1       | 2       | 3       |
|-------------------------|---|---------|---------|---------|
| <i>Pinus sylvestris</i> | R | 3,2-3,8 | 3,0-3,5 | 2,9-3,2 |
|                         | N | 3,4-4,2 | 3,3-3,9 | 3,2-3,6 |
| <i>Quercus</i> sp.      | R | 3,0-3,5 | 2,9-3,4 | 2,8-3,1 |
|                         | N | 3,4-4,0 | 3,1-3,7 | 3,0-3,4 |
| <i>Betula</i> sp.       | R | 3,6-4,1 | 3,3-3,8 | 3,1-3,5 |
|                         | N | 3,9-4,4 | 3,5-4,0 | 3,3-3,7 |
| Kontrola                | R | 3,3-3,7 | 3,0-3,3 | 2,9-3,4 |
| Control                 | N | 3,6-4,3 | 3,3-3,8 | 3,2-3,9 |

nych składników gleby, a w roztworze zmieniają się ich proporcje [Kurek 2002]. Silne zakwaszenie analizowanych gleb związane jest również z długotrwałą, intensywną emisją azotową [Kowalkowski i in. 1999]. Największe zakwaszenie gleb stwierdzono w drzewostanach dębu: 2,8-4,0 pH w 1 mol KCl/dm<sup>3</sup>, a najmniejsze w drzewostanach brzozy: 3,1-4,4 pH w 1 mol KCl/dm<sup>3</sup> (tab. 1). Wpływ gatunku drzewa na efekt zakwaszenia gleb leśnych wiąże się głównie z różnicami w sposobie ich mineralnego odżywiania, a zwłaszcza proporcji NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Podczas pobierania NH<sub>4</sub><sup>+</sup> przez korzenie roślin uwalniane są protony H<sup>+</sup>, zwiększające zakwaszenie roztworu glebowego [Kowalkowski i in. 1999]. W glebach wszystkich badanych obiektów wartości pH w ryzosferze były niższe niż w strefie pozarysoferowej, w granicach 0,2-0,6 jednostki pH w 1 mol KCl/dm<sup>3</sup> (tab. 1). Wiele bakterii ryzosferowych produkuje niskocząsteczkowe kwasy organiczne, takie jak: cytrynowy, szczawiowy, jabłkowy, bursztynowy, salicylowy, galasowy i asparaginowy, które mogą mieć istotny udział w zakwaszaniu gleb poprzez uwalnianie po dysocjacji protonów wodoru do roztworu glebowego [Kurek 2002]. Z upływem lat badań zaznaczyła się tendencja do wzrostu zakwaszenia analizowanych gleb. Wartości pH w roku 2013 były mniejsze niż w roku 2009 w granicach 0,3-0,7 jednostki pH w 1 mol KCl/dm<sup>3</sup> (tab. 1).

Wzrost odległości od Zakładów Azotowych „Puławy” S.A. wpływał istotnie na akumulację węgla organicznego w glebach wszystkich powierzchni obserwacyjnych. Zawartość tego składnika w glebach powierzchni usytuowanych najbliżej Zakładów Azotowych (9 km) była około 2,0-2,5-krotnie mniejsza niż w glebach położonych w odległości 15 i 17 km od kombinatu (ryc. 1). Czynniki różnicującymi zasobność badanych gleb w ten składnik, poza intensywnością wpływów antropogenicznych generowanych głównie przez Zakłady Azotowe, był stopień rozwoju szaty roślinnej oraz skład chemiczny rozkładającego się materiału organicznego. W badanych glebach zawartość C organicznego w ryzosferze była istotnie większa niż poza ryzosferą (ryc. 1). Z wielu badań [Lynch, Whips 1990; Priha i in. 1999; Bielińska, Kołodziej 2009] wynika, że glebę ryzosferową cechuje wyższe stężenie rozpuszczalnego węgla. Lynch i Whips [1990] wykazali, że ilość uwalnianego przez rośliny do ryzosfery C organicznego może wynosić 40% całkowitej suchej masy wytwarzanej przez roślinę.

Czynnikiem wyraźnie modyfikującym zawartość węgla organicznego w glebach powierzchni doświadczalnych (nasadzenia) był gatunek drzewa. Największą zawartość tego składnika stwierdzono w glebach pod drzewostanami sosny, a najmniejszą w drzewostanach dębu, ale nie były to statystycznie istotne różnice (ryc. 1). W innych badaniach [Priha i in. 1999; Kieliszewska-Rokicka 2001; Bielińska, Wiśniewski 2005] wykazano, że gatunek drzewa wpływa istotnie na



Ryc. 1.

Zawartość węgla organicznego w badanych glebach

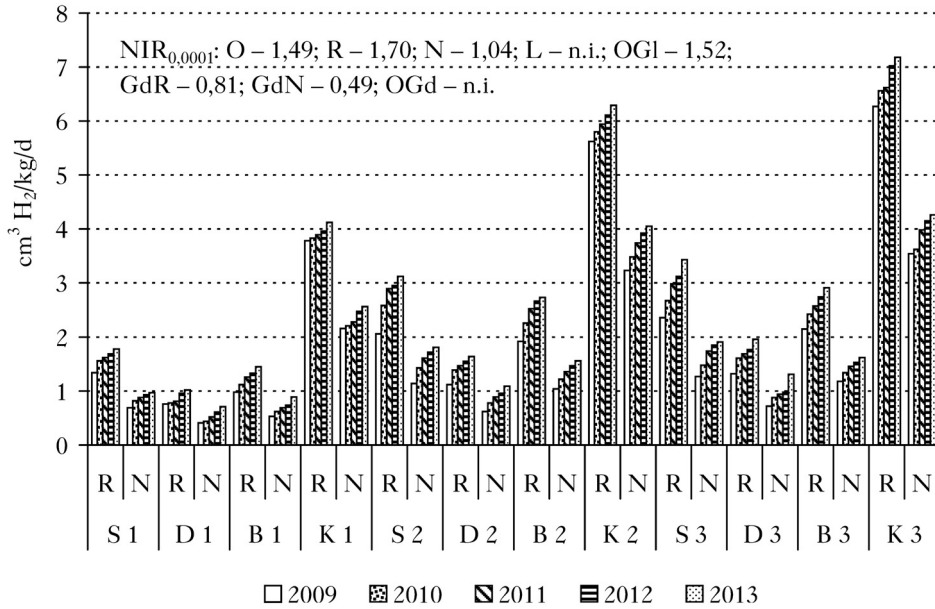
Organic carbon content in investigated soils

Obiekty (O): 1, 2 i 3 – odległość od zakładów: 9, 15 i 17 km; Gleba (Gl): R – ryzosfera i N – strefa pozaryzosferowa; L – lata; Gatunek drzewa (Gd): S – sosna; D – dąb; B – brzoza

Objects (O): 1, 2 and 3 – distance from the plant: 9, 15 and 17 km; Soil (Gl): R – rhizosphere and N – non-rhizosphere; L – years; Tree species (Gd): S – pine; D – oak; B – birch

zawartość węgla w glebach. W okresie badań największą, statystycznie istotną, zawartością C organicznego cechowały się gleby obiektów kontrolnych. Zasoby C organicznego w analizowanych glebach miały tendencję wzrastającą w czasie, ale nie były to różnice statystycznie istotne (ryc. 1). Możliwymi przyczynami wzrostu zawartości C organicznego wraz z upływem lat badań są wykazane w niniejszych badaniach korzystne zmiany aktywności enzymatycznej gleb (ryc. 2-5), nasilające w czasie mikrobiologiczny rozkład karp po zniszczonym przez emisje drzewostanie sosnowym, dostarczający glebom próchnicy, a także wzrastająca biomasa szczątków organicznych (opad ściółki) związana ze wzrostem uprawianych drzewek.

Aktywność enzymatyczna analizowanych gleb była istotnie zróżnicowana w zależności od odległości od Zakładów Azotowych i wpływu ryzosfery. Kierunek i nasilenie badanych procesów biochemicznych zależne były od indywidualnych właściwości enzymu, lat badań oraz gatunku drzewa (ryc. 2-5). Aktywność dehydrogenaz, fosfatazy kwaśnej i proteazy w badanych glebach systematycznie wzrastała wraz z odległością od Zakładów Azotowych. W glebach powierzchni usytuowanych w odległości 15 i 17 km od kombinatu aktywność tych enzymów była statystycznie istotnie większa niż w glebach pochodzących z powierzchni znajdujących się bliżej zakładów (ryc. 2-4). Prawidłowości takiej nie stwierdzono w przypadku aktywności ureazy (ryc. 5). Wysoką aktywność ureazy w glebach usytuowanych w pobliżu zakładów przemysłowych obserwowano również w innych badaniach [Januszek 1999; Bielińska 2006]. Ureaza jest odporna na działanie czynników zewnętrznych, a w warunkach stresowych obserwuje się wzrost jej aktywności. Jedynym czynnikiem limitującym jej aktywność jest dostępność substratu – mocznika, gdyż jako enzym ekstracelularny jest syntetyzowana jedynie w jego obecności [Cabrera i in. 1994]. Na wszystkich powierzchniach obserwacyjnych aktywność fosfatazy kwaśnej była około 2,0-3,0-krotnie większa, a aktywność dehydrogenaz, proteazy i ureazy od około 1,5- do 1,9-krotnie większa niż w glebie pozaryzosferowej (ryc. 2-5). Związane jest to z dy-

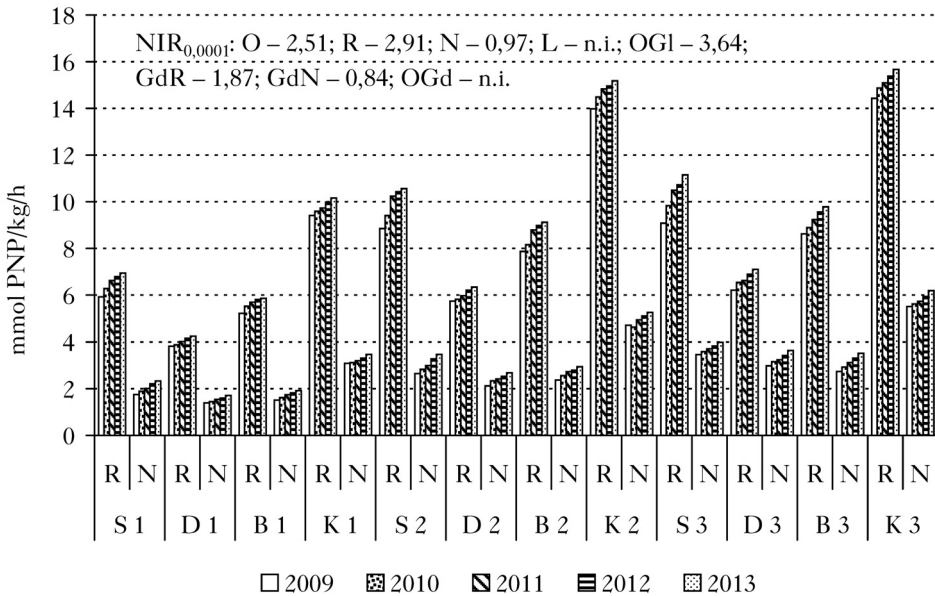


Ryc. 2.

Aktywność dehydrogenaz w badanych glebach

Dehydrogenases activity in investigated soils

Objaśnienia jak na rycinie 1; denotes as in figure 1



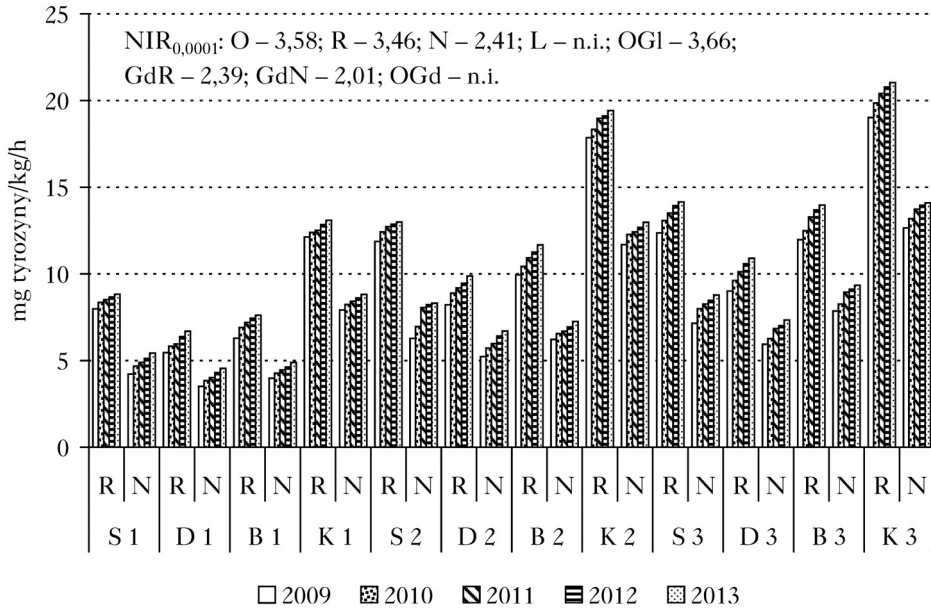
Ryc. 3.

Aktywność fosfatazy kwaśnej w badanych glebach

Acid phosphatase activity in investigated soils

Objaśnienia jak na rycinie 1; denotes as in figure 1



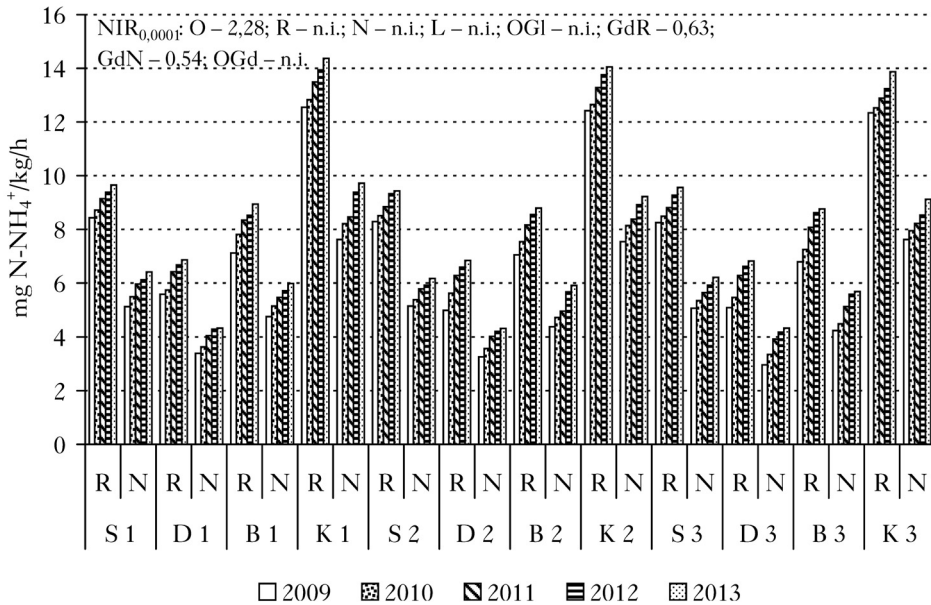


Ryc. 4.

Aktywność proteazy w badanych glebach

Protease activity in investigated soils

Objaśnienia jak na rycinie 1; denotes as in figure 1



Ryc. 5.

Aktywność ureazy w badanych glebach

Urease activity in investigated soils

Objaśnienia jak na rycinie 1; denotes as in figure 1

namicznym rozwojem mikroorganizmów w strefie korzeniowej spowodowanym obfitością łatwo dostępnej substancji energetycznej [Januszek 1999; Priha i in. 1999; Kieliszewska-Rokicka 2001]. Korzenie w czasie wzrostu wytwarzają związki organiczne, nieorganiczne oraz substancje czynne, co stymuluje znacząco aktywność enzymów glebowych [Yang i in. 2007; Vogeler i in. 2008; Bielińska, Kołodziej 2009]. Na wysoką aktywność biologiczną w glebie ryzosferowej w młodych drzewostanach, szczególnie w glebach o dużej zawartości azotu, zwraca uwagę Dahm [1998]. Warto podkreślić, że wydzieliny korzeniowe wpływają także na adaptację mikroorganizmów glebowych do degradacji zanieczyszczeń, co ma szczególne znaczenie na terenach przemysłowych [Duineveld, Van Veen 1999; Bielińska, Kołodziej 2009].

Czynnikiem modyfikującym aktywność badanych enzymów glebowych był gatunek drzewa. W okresie prowadzonych badań największą, statystycznie istotną, aktywnością enzymatyczną cechowały się gleby naturalnych ekosystemów leśnych, co wiązało się z relatywnie wysoką zawartością C organicznego (ryc. 1). W niniejszych badaniach wykazano istotną liniową zależność między aktywnością enzymów i zawartością C organicznego w glebach (tab. 2). Poziom aktywności enzymów glebowych jest determinowany głównie zawartością rozpuszczalnego węgla w glebie [Aon, Colaneri 2001; Kieliszewska-Rokicka 2001; Domżał, Bielińska 2007].

W przypadku powierzchni doświadczalnych największą aktywnością badanych enzymów cechowała się gleba w drzewostanach sosny, a najmniejszą w drzewostanach dębu (ryc. 2-5), ale nie były to różnice statystycznie istotne. W wielu badaniach wykazano istotny wpływ gatunku drzewa na aktywność niektórych enzymów w glebach leśnych [Januszek 1999; Kieliszewska-Rokicka 2001; Domżał, Bielińska 2007]. Januszek [1999] podkreśla, że oddziaływanie roślin wyższych na enzymy glebowe zależy od składu chemicznego rośliny, który w wypadku samych wydzielin korzeniowych może się różnić u poszczególnych rodzajów, gatunków, a nawet odmian. Indywidualny wpływ określonych gatunków drzew na aktywność enzymatyczną gleby jest związany z różnym składem gatunkowym bakterii zasiedlających ich korzenie [Bielińska, Kołodziej 2009]. Obserwowane w niniejszych badaniach wyraźne osłabienie aktywności enzymatycznej gleb w drzewostanach dębu mogło być efektem wydzielania fitoncydów (allelosubstancji) przez rośliny. Tkanki wielu drzew zawierają allelosubstancje, które wpływają na zmiany aktywności enzymów glebowych [Poulton 1990]. Do substancji stale znajdujących się w tkankach dębu należą glukozydy polifenolowe (tanoidy i galotaniny), których metabolity są toksyczne dla mikroorganizmów. Zawartość glukozydów polifenolowych znacznie wzrasta w przypadku pogorszenia

**Tabela 2.**

Korelacja wybranych właściwości badanych gleb  
Correlation of some properties of investigated soils

|   | 1. | 2.    | 3.    | 4.    | 5.    |
|---|----|-------|-------|-------|-------|
| 1. C organiczny<br>Organic carbon                           |    | 0,297 | 0,873 | 0,364 | 0,378 |
| 2. Aktywność dehydrogenaz<br>Dehydrogenases activity        | *  |       | 0,354 | 0,958 | 0,871 |
| 3. Aktywność fosfatazy kwaśnej<br>Acid phosphatase activity | ** | **    |       | 0,459 | 0,512 |
| 4. Aktywność proteazy<br>Protease activity                  | ** | **    | **    |       | 0,830 |
| 5. Aktywność ureazy<br>Urease activity                      | ** | **    | **    | **    |       |

\*\* istotne przy  $\alpha=0,0001$  / significant at  $\alpha=0,0001$

\* istotne przy  $\alpha=0,001$  / significant at  $\alpha=0,001$



stanu sanitarnego drzewostanów, ponieważ stanowią mechanizm obronny rośliny [Bielińska, Wiśniewski 2005]. W latach 2009-2013 obserwowano niekorzystne zmiany w drzewostanach dębu szypułkowego, szczególnie wyraźne w przypadku powierzchni obserwacyjnej usytuowanej najbliżej kombinatu. Drzewka dębu na tej powierzchni nie miały bieżącego przyrostu wysokości lub przyrost ten wynosił kilka cm. Należy podkreślić, że dąb, szczególnie na piaszczystych glebach, jest podatny na przymrozki i wymarzenie [Kowalkowski i in. 1999]. W okresie prowadzonych obserwacji zaznaczyła się wyraźna tendencja do wzrostu aktywności badanych enzymów wraz z upływem lat badań, ale nie były to różnice statystycznie istotne (ryc. 2-5).

Wyznaczone współczynniki korelacji potwierdziły ścisłą współzależność między aktywnością badanych enzymów i zawartością węgla organicznego w glebie oraz wzajemne dodatnie korelacje pomiędzy analizowanymi enzymami (tab. 2).

## Wnioski

- ✦ Wykazana w okresie 5-letnich obserwacji wyraźna tendencja do wzrostu wraz z upływem lat badań aktywności analizowanych enzymów w glebach wytypowanych powierzchni doświadczalnych wskazuje, że wprowadzenie grupowych populacji sosny z brzozą na linii dominujących kierunków wiatrów daje możliwość poprawy biologicznego stanu gleb leśnych w rejonie oddziaływania Zakładów Azotowych „Puławy” S.A.
- ✦ Obserwowana reakcja badanych enzymów wyrażona obniżeniem ich aktywności w uprawach dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.) wskazuje, że dąb nie jest odpowiednim gatunkiem do zalesiania piaszczystych gleb zdegradowanych emisjami przemysłowymi.
- ✦ Aktywność dehydrogenaz, fosfatazy kwaśnej i proteazy w badanych glebach wzrastała istotnie wraz z odległością od Zakładów Azotowych. Prawidłowości takiej nie stwierdzono w przypadku aktywności ureazy. Świadczy to, że wiarygodną ocenę jakości gleb umożliwia równoczesny pomiar aktywności szeregu enzymów glebowych.
- ✦ Obserwowana aktywizacja biologiczna gleb w strefie korzeniowej wskazuje, że ryzosfera tworzy system buforujący dla stresowych czynników środowiskowych, w tym docierających do gleb emisji przemysłowych.
- ✦ Zaobserwowane korzystne zmiany parametrów opisujących stan biologiczny badanych gleb leśnych na terenie Nadleśnictwa Puławy potwierdzają, że gleby te wymagają działań ochronnych, zmierzających do utrzymania ich potencjału produkcyjnego poprzez optymalne biologiczne zagospodarowanie zdegradowanych lasów.

## Literatura

- Aon M. A., Colaneri A. C. 2001. Temporal and spatial evolution of enzymatic activities and physico-chemical properties in an agricultural soil. *Appl. Soil Ecology* 18: 255-270.
- Bielińska E. J. 2006. Wpływ długoletniej emisji azotowej na aktywność enzymatyczną gleb leśnych. *Rocz. Glebozn.* 57 (1/2): 32-40.
- Bielińska E. J., Futa B., Mocek-Płóćiniak A. 2014. Enzymy glebowe jako bioindykatory jakości i zdrowotności gleby. Monografia Naukowa. Towarzystwo Wydawnictw Naukowych Libropolis, Lublin.
- Bielińska E. J., Kołodziej B. 2009. The effect of common dandelion (*Taraxacum officinale* Web.) rhizosphere on heavy metal content and enzymatic activity on soils. *Acta Horticulturae* 826: 345-350.
- Bielińska E. J., Mocek-Płóćiniak A., Kaczmarek Z. 2008. Indices of the eco-chemical condition of forest soils on a large-area forest fire. *Polish J. of Environ. Stud.* 17 (5): 665-671.
- Bielińska E. J., Wiśniewski J. 2005. Enzymatic activity of soil in the rhizosphere of selected varieties of fruit-trees. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu w Iasi (Rumunia), Agronomia* 48: 1-8.
- Brożek S., Lasota J., Zwydak M., Wanic T., Gruba P., Lasota J. 2007. Kierunki doskonalenia metod rozpoznawania siedlisk leśnych. *Sylwan* 151 (2): 26-34.
- Brożek S., Zwydak M., Wanic T., Gruba P., Błońska E. 2011. Zastosowanie siedliskowego indeksu glebowego (SIG) w diagnozie typów siedlisk leśnych. *Rocz. Glebozn.* 62 (4): 133-149.

- Cabrera M. L., Kissel D. L., Bock B. R. 1994. Urea hydrolysis in soil: Effect of urea concentration and soil pH. *Soil Biol. Biochem.* 23: 1121-1124.
- Dahm H. 1998. Fizjologiczne aspekty ektonikoryz. *Ekologiczne aspekty mikrobiologii gleby*. Wyd. AR Poznań. 21-29.
- Domżał H., Bielińska E. J. [red.]. 2007. Ocena przeobrażeń środowiska glebowego i stabilności ekosystemów leśnych w obszarze oddziaływania Zakładów Azotowych „Puławy” S.A. *Acta Agrophysica* 145, Rozprawy i Monografie 2: 79-90.
- Duineveld B. M., Van Ven J. A. 1999. The number of bacteria in the rhizosphere during plant development: relating colony-forming units to different reference units. *Biol. Fertil. Soils* 28: 285-291.
- Januszek K. 1999. Aktywność enzymatyczna wybranych gleb leśnych Polski południowej w świetle badań polowych i laboratoryjnych. *Zesz. Nauk. AR Kraków, Seria Rozprawy* 250.
- Kaszewski B. M. 2008. Warunki klimatyczne Lubelszczyzny. Wyd. UMCS Lublin.
- Kieliszewska-Rokicka B. 2001. Enzymy glebowe i ich znaczenie w badaniach aktywności mikrobiologicznej gleby. W: Dahm H., Pokojska-Burdziej A. [red.]. *Drobnoustroje środowiska glebowego*. UMK Toruń. 37-47.
- Klasyfikacja gleb leśnych Polski 2000. CILP, Warszawa.
- Kopron H. 2007. Rewitalizacja terenów poleśnych w otoczeniu Zakładów Azotowych w Puławach. *Towarzystwo Przyjaciół Puław*.
- Kowalkowski A. 1999. Rola gleboznawstwa i geologii w typologicznej analizie lasu. *Sylvan* 143 (10): 95-117.
- Kowalkowski A., Kopron H., Lewandowska J., Jedliczek S., Płecha R. 1999. Możliwości przywracania funkcji leśnych w długotrwale nieczównoważonym ekosystemie leśnym Nadleśnictwa Puławy. *Kom. Nauk Leśnych PAN, Warsztaty Naukowe „Funkcjonowanie gleb leśnych na terenach zagrożonych i trendy jego zmian”*. Puławy 16-17 września 1999. 49-63.
- Kurek E. 2002. Związki przyczynowo-skutkowe aktywności mikrobiologicznej i zakwaszenia gleb. *Zesz. Prob. Post. Nauk Roln.* 482: 307-316.
- Ladd N., Butler J. H. A. 1972. Short-term assays of soil proteolytic enzyme activities using proteins and dipeptide derivatives as substrates. *Soil Biol. Biochem.* 4: 19-30.
- Lasota J. 2013. Siedliskowo-florystyczna analiza środkowoeuropejskiego acydoofilnego lasu dębowego (*Calamagrostio arundinaceae-Quercetum petraeae* [Hartm. 1934], Scam. et Pass. 1959). *Zesz. Nauk. Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kołłątaja w Krakowie* 516.
- Lynch J. M., Whipps J. M. 1990. Substrate flow in the rhizosphere. *Plants a Soil* 129: 1-10.
- Mocek A., Drzymała S. 2010. Geneza, analiza i klasyfikacja gleb. Wyd. Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu. *Ochrona środowiska*. 2012. GUS, Warszawa.
- Pieter S. J., Węgrzyn T., Klimasz D. 2002. Mikroflora saprofityczna ryzosfery wybranych roślin darniowych sudeckiego boru świerkowego. Aktywność drobnoustrojów w różnych środowiskach. Wyd. AR Kraków. 151-156.
- Poulton J. E. 1990. Cyanogenesis in plants. *Plant Physiol.* 94: 401-405.
- Priha O., Hallantie T., Smolander A. 1999. Comparing microbial biomass, denitrification enzyme activity and numbers of nitrifiers in the rhizosphere of *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula pendula* seedlings with microscale methods. *Fertility of Soils*, Springer-Verlag.
- Sewerniak P. 2012a. Wpływ właściwości gleb piaszczystych na bonitację drzewostanów sosnowych w południowo-zachodniej Polsce. I. Odczyn, zawartość CaCO<sub>3</sub> i cechy związane z głębokością gleby. *Sylvan* 156 (6): 427-436.
- Sewerniak P. 2012b. Wpływ właściwości gleb piaszczystych na bonitację drzewostanów sosnowych w południowo-zachodniej Polsce. II. Wybrane właściwości chemiczne. *Sylvan* 156 (7): 518-525.
- Sewerniak P., Piernik A. 2012. Ujęcie wpływu właściwości gleb piaszczystych na bonitację drzewostanów sosnowych w południowo-zachodniej Polsce w modelach regresji. *Sylvan* 156 (8): 563-571.
- Siuta J. 2002. Inżynieria ekologiczna w mojej działalności. Wyd. Nauk. Gabriel Borowski, Warszawa.
- Tabatabai M. A., Bremner J. M. 1969. Use of p-nitrophenol phosphate for assay of soil phosphatase activity. *Soil Biol. Biochem.* 1: 301-307.
- Tarafdar J. C., Jungk A. 1987. Phosphatase activity in the rhizosphere and its relation to the depletion of soil organic phosphorus. *Biol. Fertil. Soils* 3: 199-204.
- Thalman A. 1968. Zur Methodik derestimmung der Dehydrogenase aktivität in Boden mittels Triphenyltetrazoliumchlorid (TTC). *Landwirtsch. Forsch.* 21: 249-258.
- Vogeler I., Vachey A., Deurer M., Bolan L. 2008. Impact of plants on the microbial activity in soil with high and low levels of copper. *Eur. J. Soil Biol.* 44: 92-100.
- Yang Z. X., Tang J., Chen X., Hu S. 2007. Effect of coexist plant species on soil microbes and soil enzymes in metal lead contaminated soils. *Appl. Soil Ecol.* 37: 240-246.
- Zantua M. I., Bremner J. M. 1975. Comparison of methods of assaying urease activity in soils. *Soil Biol. Biochem.* 7: 291-295.