

PIOTR GRUBA

Toksyczność glinu (Al) w glebach leśnych

Aluminium toxicity in forest soils

ABSTRACT

The paper presents recent research results on the effect of aluminium (Al) toxicity on forest soils. It has been stated that with the present acidification level of the environment the toxic effect of aluminium compounds does not threaten the sustainability of stands. At the same time, the simulation of heavy acidification of soil environment has proved that mixed stands are more resistant to Al than pure spruce stands growing under the same conditions.

KEY WORDS

aluminium (Al), toxicity, forest soils, Poland

Wstęp

Wiedza o problemie toksyczności glinu w leśnictwie jest skromna i stereotypowa, bazująca głównie na doświadczeniu z rolnictwa. Zarówno badania nad toksycznością glinu jak i jego złożonymi właściwościami chemicznymi rozwijają się bardzo intensywnie, a poglądy prezentowane w różnych publikacjach sprzed kilku lat są dziś dalece bardziej rozwinięte lub też zostały obalone. Utrudnieniem w śledzeniu postępu naukowego jest dominacja literatury anglojęzycznej w tej dziedzinie. Niniejsza praca ma na celu przybliżenie najważniejszych informacji dotyczących problemu toksyczności glinu w glebach leśnych w świetle literatury i badań własnych.

Rozwój badań

W Polsce prekursorami badań nad toksycznym oddziaływaniem glinu na korzenie drzew byli Królikowski i Ciok [1968]. Stwierdzili oni, że negatywny wpływ glinu na siewki sosny zaznaczał się już przy zawartości 10–15 mg Al na 100 g gleby. Negatywny wpływ glinu na uprawy sosnowe dowiedli Prusinkiewicz i Krzemień [1974]. Autorzy zwrócili uwagę na zakłócenia w gospodarce azotowej i magnezowej sadzonek powodowanej przez nadmiar glinu oraz zasugerowali potrzebę uwzględniania zjawiska toksyczności glinu w planowaniu prac melioracyjnych.

Toksyczne oddziaływanie glinu na rośliny koncentruje się głównie na systemie korzeniowym. Następuje ograniczanie wzrostu elongacyjnego korzeni głównych i bocznych, blokowanie podziałów komórkowych i zakłócenie przyswajania składników pokarmowych [Królikowski i Ciok 1968, Prusinkiewicz i Krzemień 1974, Marschner 1991]. W komórkach korzeni następuje zakłócenie syntezy DNA, wywołujące redukcję wzrostu komórek korzeni [Bennet i Breen 1991]. Pod wpływem oddziaływania glinu korzenie grubieją, brązowieją i przestają rosnąć, przyjmując postać krzaczastą [Prusinkiewicz i Krzemień 1974, Borkowska 1988, Pokojka 1989].

PIOTR GRUBA

Katedra Gleboznastwa Leśnego
Akademia Rolnicza
ul. 29 Listopada 46
31-425 Kraków

Kluczowe dla pobierania wapnia i magnezu jest ich wiązanie przez grupy karboksylowe w ścianach komórkowych korzeni. Właściwy przebieg procesu pobierania kationów dwuwartościowych jest uzależniony od stopnia wysycenia tych wiązań przez Ca^{2+} i Mg^{2+} .

W kwaśnych roztworach glebowych, w którym stosunek aktywności Ca^{2+} i Mg^{2+} do Al^{3+} jest niski, może dojść do intensywnego zastępowania kationów wapnia i magnezu przez kation Al^{3+} , co prowadzi do zaburzeń gospodarki mineralnej [Marschner 1991, 1996]. Obszerne badania wykonane w latach osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku ujawniły inne zależności pomiędzy stężeniem glinu w roztworze glebowym a fizjologicznymi funkcjami roślin. Badania Blamey'a i Dowling'a [1995] potwierdziły duże znaczenie komponentów apoplastu. Sole pektynowo-wapniowe lub magnezowe (sole Ca, Mg i reszt kwasu D-galakuronowego), naturalny składnik blaszek środkowych pomiędzy ścianami komórkowymi, były błyskawicznie wysycane przez kationy Al, co ograniczało prawidłowe pobieranie składników pokarmowych. Badania Van Praaga i in. [1997] potwierdziły, że jednym z najlepiej udowodnionych efektów oddziaływania glinu na korzenie roślin jest wypieranie Ca i Mg ze ścian komórkowych walca osiowego korzeni. Przedmiotem badań były sześciomiesięczne sadzonki świerka wzrastające w kulturach wodnych z różną zawartością glinu, wapnia (^{45}Ca) i magnezu (^{28}Mg). Obniżenie wartości $\text{Ca}^{2+}:\text{Al}^{3+}$ istotnie ograniczało przemieszczanie się wapnia do centralnej części walca osiowego korzeni. Jednocześnie stwierdzono, że podwojenie stężenia Ca, Mg i Al w roztworze nie zwiększało negatywnego efektu glinowego. Godny uwagi jest fakt, że w obecności glinu pobieranie magnezu przez sadzonki świerka drastycznie spadało. Innym opisanym efektem oddziaływania glinu na korzenie drzew było przedwczesne zatykanie przegród sitowych przez kallozę (wielocukier o konfiguracji spiralnej złożony z reszt -glukozy, zmniejszający z upływem czasu powierzchnię światła elementów przewodzących aż do całkowitego zaniku przewodzenia [Zurzycki i Michniewicz 1985]). Analiza korelacji pomiędzy zawartością Al^{3+} w roztworze glebowym a zawartością kallozy w korzeniach świerka przeprowadzona przez Wissemeiera i in. [1998] w laboratoryjnych warunkach wzrostu potwierdziła zależność stwierdzoną wcześniej w przypadku zbóż, ale współczynniki korelacji w przypadku świerka nie były tak zadowalające.

Ograniczanie dostępności fosforu było początkowo uznawane za najważniejszy efekt negatywnego oddziaływania glinu, szczególnie pod względem wytrącania się kompleksów glinowo-fosforowych na korzeniach roślin [Moskal 1955, Gawliński 1978]. Jakkolwiek Prusinkiewicz i Krzemień [1974] nie potwierdzili tej tezy w przypadku sosny pospolitej, to wiązanie anionów fosforanowych z kationami glinu zasorbowanymi uprzednio przez ściany komórek korzeni buka zostało potwierdzone przez Aspa i Berggrena [1990]. Nie stwierdzono jednak istotnych zakłóceń pokrycia zapotrzebowania na fosfor, co autorzy tłumaczą hipotezą, że pozytywnie naładowane kompleksy Al-fosforanowe mogą być pobierane przez rośliny.

WSKAŹNIKI TOKSYCZNOŚCI GLINU. Na początku lat osiemdziesiątych Ulrich [1983] zaproponował wartość ilorazu molowych stężeń wapnia do glinu ($\text{Ca}^{2+}:\text{Al}^{3+}$) jako wskaźnik toksyczności glinu w obliczeniach geochemicznych w rozpoczynających się wówczas badaniach nad zamieraniem lasów w Europie i obliczeniami tzw. ładunku krytycznego (critical load). Wyniki badań nad wskaźnikiem $\text{Ca}^{2+}:\text{Al}$ i jego zastosowaniem zostały zebrane, opracowane i przez Sverdrupa i Warfvinaga [1993] w raporcie obejmującym znaczną liczbę obserwacji przeprowadzonych przez wielu autorów w warunkach kontrolowanego wzrostu (kultury hydroponiczne, piaskowe, zawieszinowe i glebowe). Potwierdzono, że przy spadku wartości Ca:Al poniżej 1 następował znaczny spadek przyrostu korzeni w odniesieniu do doświadczeń kontrolnych. Raport został przyjęty krytycznie, zakwestionowano sposób przeliczania danych pochodzących z doświadczeń o różnych założeniach metodycznych. Szczególnie negatywnie oceniono próbę przenoszenia wyników badań laboratoryjnych na warunki polowe, bez uwzględnienia obecności materii organicznej, obecności mikoryz i wieku drzew. Przeprowadzone w świerkowych lasach Południowej Norwegii (las eksperymentalny w Nordmoen) badania nad reakcją dojrzałego

drzewostanu świerkowego na zmianę relacji $\text{Ca}^{2+}:\text{Al}^{3+}$ w roztworze glebowym nie wykazały obniżenia parametrów przyrostowych i żywotności drzew nawet przy spadku $\text{Ca}:\text{Al}$ znacznie poniżej 1 [De Wit i in. 1999]. Tylko w wariantcie najsilniej traktowanym glinem istotnie obniżyła się zawartość Mg w igliwiu świerków, co potwierdziło szczególną rolę magnezu w zjawisku toksycznego oddziaływania glinu. Nie stwierdzono natomiast zmian w morfologii korzeni [Nygaard i De Wit 2000]. Autorzy zwrócili uwagę, że morfologia korzeni świerków rosnących w roztworach hydroponicznych jest nienaturalna, natomiast ciemne, często rozgałęziające się korzonki są według badań laboratoryjnych efektem silnego stresu glinowego, niemniej jest to najczęściej spotykana postać korzeni świerka w warunkach naturalnych. Stąd wniosek, że gatunki drzew leśnych jak świerk, są przystosowane do wzrostu na kwaśnych glebach, a zmiany morfologiczne korzeni pod wpływem oddziaływania Al^{3+} są naturalnym czynnikiem wzrostu i kształtowania się postaci korzeni. W ostatnich latach sporadycznie pojawiają się prace potwierdzające wartość wskaźnika $\text{Ca}:\text{Al}=1$ jako próg toksyczności Al [Hruška i in. 2001], jednak częściej mówi się o potrzebie opracowania nowych wskaźników, uwzględniających mechanizmy odporności drzew.

MECHANIZMY ADAPTACJI ROŚLIN DO WZROSTU W WARUNKACH SZKODLIWEGO ODDZIAŁYWANIA GLINU. Rozpoznano dotychczas różne strategie adaptacji roślin do gleb kwaśnych, o wysokim stężeniu Al^{3+} w roztworze glebowym, zależne zarówno od predyspozycji konkretnego gatunku jak również warunków środowiskowych [Marschner 1991]: zapotrzebowanie rośliny na składniki pokarmowe (jako cecha gatunkowa), szybki obieg składników pokarmowych, wysoka odporność poszczególnych tkanek roślinnych na oddziaływanie Al, selektywność pobierania mineralnych składników pokarmowych na powierzchni korzenia, zmiany w ryzosferze powodowane przez korzenie (związane z wydzielaniem), korzystna działalność mikroorganizmów ryzosferowych. Pośród strategii związanych ze wzrostem w kwaśnych glebach, dla drzew leśnych najistotniejsze są zmiany powodowane przez korzenie w strefie ryzosferowej. Zmienia się stężenie kationów i anionów, pH i ilość związków organicznych. Zmiany te znajdują swoje odzwierciedlenie w wielkości populacji mikroorganizmów ryzosferowych [Wood 1995]. Uwalnianie różnych form węgla organicznego przez korzenie, grzyby mikoryzowe i organizmy wolno żyjące, osiąga nawet do 30% suchej masy ogólnej produkcji podziemnych części roślin [Whipps i Lynch 1986 cyt. za Marschner 1991]., Ze względu na wysoką zdolność wiązania kationów [Heim i in. 1999], szczególnie Al^{3+} w glebach kwaśnych, za szczególnie ważne uznano wydzielane przez mikoryzy związki organiczne. Badania Göttleina i in. [1999] wykazały, że aktywność korzeni w kwaśnych glebach wpływała na właściwości środowiska glebowego zarówno przez zmniejszenie zawartości kationów zasadowych jak i przez podniesienie koncentracji glinu w roztworze glebowym i kompleksie sorpcyjnym gleby, w stopniu zależnym od odległości od powierzchni korzenia. Największe zmiany zachodziły w odległości do 5 mm, nastąpiło obniżenie stężenia potasu, wapnia i magnezu, wzrost ilości Al^{3+} , obniżyło się również pH, a wartość $\text{Ca}:\text{Al}$ zmalała.

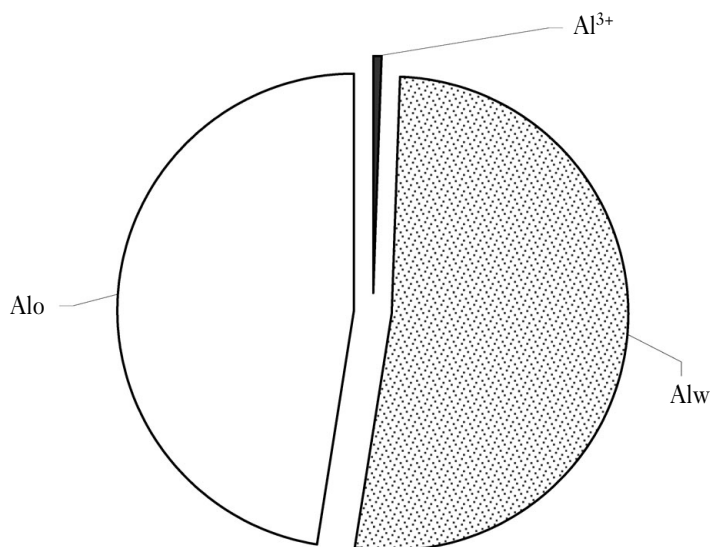
Potencjalna toksyczność glinu w glebach leśnych

Kompleksowe badania dotyczące m. in. glinu w glebach leśnych zostały wykonane na obszarze Żywiecczyny, na terenie nadleśnictw: Andrychów, Jelesnia, Ujsoły, Węgierska Góra i Wisła. Odkrywki glebowe były zlokalizowane w litych drzewostanach świerkowych i drzewostanach mieszanych (z udziałem buka, jodły i świerka). Badania objęły strefę regla dolnego, tj. wysokość od 600 do 1100 m n.p.m. [Maciaszek i in. 2000]. Nie publikowane dotychczas rezultaty tych badań związane z występowaniem toksycznej formy Al^{3+} są prezentowane poniżej.

Zawartość Al^{3+} oznaczono w roztworach otrzymanych w warunkach laboratoryjnych. Metodykę wykonania oraz pozyskania takiego roztworu oraz metodykę oznaczenia Al^{3+} opisano w pracy Gruby [2003]. Oznaczono również glin wymienny w wyciągu 1 M KCl (Alw), natomiast glin związany z glebową materią organiczną (Alo), oznaczono pośrednio przez ekstrakcję gleby z 0,1 M $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ (Alp) ($\text{Alo}=\text{Alp}-\text{Alw}$). Należy jednak zaznaczyć, że ilości glinu oznaczanego poprzez ekstrakcję gleby z wymienionymi odczynnikami są znacznie wyższe niż ilość potencjalnie toksycznego Al^{3+} . Proporcję pomiędzy zawartością Al^{3+} a innymi frakcjami glinu w badanych glebach przedstawia rycina 1. W poziomach próchnicznych gleb świerczyn zawartość Al^{3+} stanowiła średnio zaledwie 0,36% zawartości glinu potencjalnie reaktywnego, dominował natomiast glin wymienny (Alw) i glin związany z glebową materią organiczną (Alo).

Oznaczanie Al^{3+} należy do najtrudniejszych analiz stosowanych w naukach o glebie, dlatego też istnieje zapotrzebowanie na modele pozwalające w przybliżeniu oszacować aktywność Al^{3+} . Pozwalają też oszacować wartość wskaźnika $\text{Ca}^{2+}:\text{Al}^{3+}$, który należy uważać za wskaźnik ekologiczny choć jego wartość krytyczna dla gleb leśnych jest wciąż nieznaną. Przykładem prostego sposobu pozwalającego oszacować aktywność glinu w glebach leśnych jest wzór opracowany przez Grubę i Muldera [2003]. Przedstawiony przez autorów model do oszacowania aktywności Al^{3+} wymaga tylko dwóch, łatwych do zmierzenia parametrów: pH roztworu glebowego (może być pH w H_2O) i pH gleby w 1M KCl.

Gleby litych drzewostanów świerkowych okazały się wrażliwe na wpływ kwaśnych imisji, a za jedną z głównych przyczyn zamierania drzewostanów w latach osiemdziesiątych uznawano wysokie stężenia glinu w roztworach glebowych [Ulrich 1983]. Badania porównawcze



Ryc. 1.

Procentowa zawartość badanych frakcji glinu potencjalnie reaktywnego w poziomach próchnicznych świerczyn (wartości średnie z 12 profili). Al^{3+} – glin potencjalnie toksyczny, Alw – glin wymienny oznaczony w wyciągu 1M KCl i Alo – glin związany z glebową materią organiczną, oznaczony jako różnica pomiędzy glinem oznaczonym w wyciągu 0,1 M $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ i 1M KCl ($\text{Alo}=\text{Alp}-\text{Alw}$)

Percentage content of potentially reactive aluminium fractions in the humus horizon in spruce stands (mean values from 12 profiles). Al^{3+} – potentially toxic aluminium, Alw – aluminium associated with soil organic matter defined as the difference between labelled aluminium in 0.1 M of $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ and 1 M of KCl ($\text{Alo}=\text{Alp}-\text{Alw}$)

przeprowadzone w glebach na terenie Żywiecczyzny wykazały, że aktualnie wartości wskaźnika $\text{Ca}^{2+}:\text{Al}^{3+}$ są niższe w glebach świerczyn (S) niż w glebach drzewostanów mieszanych (M), należy jednak zaznaczyć, że wartości tego wskaźnika w glebach świerczyn nie spadały poniżej wartości uznawanych za toksyczne (tabela).

Przy silnym zakwaszeniu (pH ok. 3), gdy badane gleby zostały podane warunkom symulującym intensywny wpływ kwaśnego opadu, wskaźnik $\text{Ca}^{2+}:\text{Al}^{3+}$ w glebach świerczyn obniżył się do wartości które można rozważać jako toksyczne, natomiast w glebach drzewostanów mieszanych wartości wskaźnika $\text{Ca}^{2+}:\text{Al}^{3+}$ utrzymały się na bezpiecznym poziomie. Zróżnicowanie wskaźnika $\text{Ca}^{2+}:\text{Al}^{3+}$ w poziomach próchnicznych gleb drzewostanów świerkowych i mieszanych można tłumaczyć zróżnicowaniem zawartości wapnia, wynikającym ze specyficznej zdolności drzewostanów do wykorzystywania zasobów skały macierzystej (ryc. 2). Ogólnie można powiedzieć, że drzewostany o mieszanym składzie gatunkowym (z udziałem buka) mają większą zdolność do wykorzystania zasobności skały macierzystej gleb, pod warunkiem, że zawartość wapnia w skałe macierzystej przekracza wartość $5 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ gleby. W poziomach próchnicznych tych gleb wartość wskaźnika $\text{Ca}^{2+}:\text{Al}^{3+}$ utrzymuje się na wyższym poziomie niż w glebach pod litymi drzewostanami świerkowymi.

Podsumowanie

- ✦ Problem toksyczności glinu w glebach leśnych jest złożony, obejmuje bardzo złożone chemiczne właściwości glinu, fizjologię drzew i zachodzące pomiędzy nimi interakcje.
- ✦ Ilość glinu oznaczonego w stałej fazie gleby lub roztworze glebowym nie może być uznawana za wskaźnik toksyczności Al, większe zastosowanie mają ilorazy stężeń molowych, np. $\text{Ca}^{2+}:\text{Al}^{3+}$, choć obecnie znane wartości krytyczne nie są pewne.
- ✦ Mechanizmy toksycznego oddziaływania glinu i jego właściwości chemiczne wskazują, że zjawisko toksyczności glinu z największą siłą objawia się podczas nagłego, silnego zakwaszenia gleb, w których dotychczas nie było problemu toksyczności glinu. Drzewostany, które bez gwałtownych zmian środowiskowych wzrastają w glebach silnie kwaśnych są mniej narażone.
- ✦ Przy obecnym poziomie kwaśnych imisji przemysłowych toksyczność glinu nie stanowi zagrożenia dla trwałości górskich drzewostanów świerkowych, natomiast nie można wykluczyć obniżenia ich przyrostu czy ogólnej kondycji drzew.
- ✦ Lite górskie drzewostany świerkowe regla dolnego są potencjalnie bardziej zagrożone toksy-

Tabela.

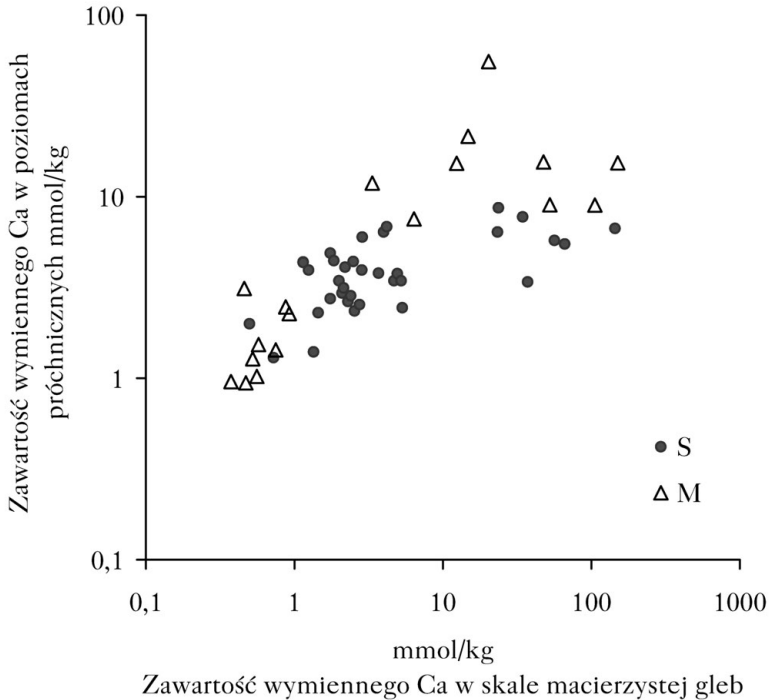
Średnie wartości wskaźnika $\text{Ca}^{2+}:\text{Al}^{3+}$ oznaczone w roztworach symulujących roztwór glebowy, o pH aktualnym i pH obniżonym do wartości ok. 3. Próbki pochodziły z badanych gleb drzewostanów świerkowych (S) i mieszanych (M). Podano poziom istotności różnic w parach wartości średnich S-M

Mean values of the $\text{Ca}^{2+}:\text{Al}^{3+}$ indicator labelled in solutions simulating soil solutions with active pH and pH lowered to ca 3. Soil samples were collected from spruce stands (S) and mixed stands (M). Significance level was given in mean pairs S-M

pH	n	$\text{Ca}^{2+} : \text{Al}^{3+}$ w glebach:	
		świerczyn (S)	drzewostanów mieszanych (M)
aktualne	12	2,56*	4,77
		sd 1,90	sd 2,95
obniżone do ok. 3	12	0,36**	1,07
		sd 0,21	sd 0,69

* $p=0,05-0,01$; ** $p=0,01-0,001$; sd – odchylenie standardowe

* $p=0,05-0,01$; ** $p=0,01-0,001$; sd – standard deviation



Ryc. 2.

Zależność pomiędzy zawartością wapnia w poziomach skał macierzystych a zawartością wapnia w poziomach próchnicznych badanych gleb drzewostanów świerkowych (S) i o mieszanym składzie gatunkowym (M)

Relationship between the content of calcium in the parent rock horizons and the content of calcium in the humus horizons of soils under spruce stands (S) and mixed stands (M)

cznym wpływem glinu niż rosnące w podobnych warunkach drzewostany o mieszanym składzie gatunkowym.

Literatura

- Asp H., Berggren D. 1990. Phosphate and calcium uptake in beech (*Fagus sylvatica*) in the presence of aluminium and natural fulvic acids. *Physiol. Plant.* 80: 307-314.
- Bennet R.J., Breen C.M. 1991. The aluminium signal: New dimension to mechanisms of aluminium tolerance. *Plant and Soil* 134: 153-166.
- Blamey F.C., Dowling A.J. 1995. Antagonism between aluminium and calcium for sorption by calcium pectate. *Plant and Soil* 171: 137-140.
- Borkowska G. 1988. Toksyczność glinu (Al). *Wiadomości Botaniczne* 32: 157-166.
- De Wit H.A., Mulder J., Nygaard P.H., Aamild D., Huse M., Kortnes E., Wollebék G., Brean R. 1999. Aluminium: The need for a re-evaluation of its toxicity and solubility in mature spruce stands. *Water, Air and Soil Pollution*, in press: special issue for Critical Load Conference in Copenhagen.
- Gawliński S. 1978. Badania nad wpływem glinu rozpuszczalnego na pobieranie fosforu i wzrost sadzonek sosny zwyczajnej. *Rocz. Glebozn.* 3: 61-77.
- Göttlein A., Heim A., Matzner E. 1999. Mobilisation of aluminium in the rhizosphere soil solution of growing tree roots in acidic soil. *Plant and Soil* 211: 41-49.
- Gruba P. 2003. Glin w glebach leśnych regionu Żywieckiego. *Rocz. Glebozn.* 3/4: 1-10.
- Gruba P., Mulder J. 2003. A simple model to describe the aluminium solubility in a range of acid brown forest soils, southern Poland. Artykuł przedłożony do *European Journal of Soil Science*.
- Heim J., Luster I., Bruner B., Frey, Frossard E. 1999. Effects of aluminium treatment on Norway spruce roots: Aluminium binding forms, element distribution, and release of organic substances. *Plant and Soil* 216: 103-116.

- Hruška J., Cudlín P., Krám P. 2001. Relationship between Norway spruce status and soil water cation/aluminium ratios in the Czech Republic. *Water, Air, and Soil Pollution* 130: 983-988.
- Królikowski L., Ciok B. 1968. Glin wymienny hamuje rozwój i wzrost siewek sosnowych. *Prace IBL*. 365: 13-19.
- Maciaszek W., Gruba P., Januszek K., Lasota J., Wanic T., Zwydak M. 2000. Degradacja i regradacja gleb pod wpływem gospodarki leśnej na terenie Żywiecczyny. Wydawnictwo AR w Krakowie.
- Marschner H. 1991. Mechanism of adaptation of plants to acid soils. *Plant and Soil* 134: 120.
- Marschner H. 1996. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, 2nd edition.
- Moskal S. 1955. Glin ruchomy w glebach Polski. *Rocz. Glebozn.* 4: 149-179.
- Nygaard P.H., De Wit H.A. 2000. Effects of enhanced Al concentration on fine root growth and mortality in a mature spruce stands. Manuscript. W: De Wit H.A.: Solubility controls and phyto-toxicity of aluminium in mature Norway spruce forest. Doctor Scientiarum Thesis 2000:14. Agricultural University of Norway.
- Pokojska U. 1989. Różne aspekty toksyczności glinu dla roślin. *Przeg. Nauk. Lit. Rol. i Les.* 35/1: 97-104.
- Prusinkiewicz Z., Krzemień K. 1974. Toksyczny wpływ wolnego glinu z orsztynowego poziomu bielicy na rozwój siewek sosny pospolitej *Pinus sylvestris* L. *Rocz. Glebozn.* 25: 207-219.
- Sverdrup H., Warfvinge P. 1993. Effect of soil acidity on trees and plants as expressed by the (Ca+Mg+K)/Al ratio. Reports in Ecology and Environmental Engineering, Lund, Sweden.
- Ulrich B. 1983. Soil acidity and its relation to acid deposition. W: Ulrich B, Pankrath J. [red.]. Effects of accumulation of air pollutants in forest ecosystems. D. Reidel, Boston: 127-146.
- Van Praag H.J., Weissen F., Dreze P., Cogneau M. 1997. Effects of aluminium on calcium and magnesium uptake and translocation by root segments of whole seedlings of Norway spruce (*Picea abies* Karst.) *Plant and Soil* 189: 267-273.
- Wissemeier A.H., Hahn G., Marschner H. 1998. Callose in roots of Norway spruce (*Picea abies* (L.)Karst.) is a sensitive parameter for aluminium supply at forest site (Hglwald). *Plant and Soil* 199: 53-57.
- Wood M. 1995. A mechanism of aluminium toxicity to soil bacteria and possible ecological implications. *Plant and Soil*

SUMMARY

Aluminium toxicity in forest soils

Available Polish literature on aluminium (Al) toxic effect on forest soils is scant and often outdated. The pioneer research carried out in Poland confirmed toxic effect of aluminium on pine roots, however the mechanisms of this effect have not been recognised. During the last two decades, the worldwide research revealed the complexity of chemical properties of aluminium and the toxic effect of excessive amounts of aluminium compounds in the soil environment on the roots of trees. The most noteworthy is the publication concerning the indicators of aluminium toxicity and the threshold values of these indicators. Recent studies of forest soils carried out in Żywiecczyna have shown that with the present level of acidification of the environment the toxic aluminium compounds do not affect the sustainability of stands. At the same time the simulation of heavy acidification of soils has proved that mixed stands are more resistant to Al than pure spruce stands growing under the same conditions.