

# DYNAMIKA EKOCHEMICZNYCH WŁAŚCIWOŚCI GLEB W REGENERACYJNEJ UPRAWIE SOSNOWEJ

Alojzy Kowalkowski, Halina Kopron

**Kowalkowski A., Kopron H., 2006:** Dynamika ekochemicznych właściwości gleb w regeneracyjnej uprawie sosnowej (*Dynamics of ecogeochemical soil properties in regenerating Pinus culture*). Monitoring Środowiska Przyrodniczego nr.7, s. 73-85, Kieleckie Towarzystwo Naukowe, Kielce.

**Zarys treści:** W odległości 1,4km NE od dużego emitera, na industriogenicznie zniszczonych poleśnych glebach, założono w roku 1996 regeneracyjną uprawę sosnową. W procesie zakładania uprawy przy wyorywaniu bruzd zmieniono strukturalną budowę powierzchni ziemi i górnej części profilu glebowego do głębokości 40cm, wykonano także kompensacyjne nawożenie mineralne Ca, Mg, K i P. Próbkę glebową, od jesieni 1995 do jesieni 2004, w 28 terminach pobrano z pięciu głębokości do 45cm w porach przedwiośnia, lata i jesieni. Na podstawie zebranych danych przedstawiono w tab. 1-3 oraz na ryc. 1-6 charakterystykę obiektu badań i metod laboratoryjnych, ekochemiczne zmiany i stan warstwy ryzosfery w glebie przed założeniem uprawy sosnowej, ekochemiczne zmiany w tej warstwie po założeniu uprawy sosnowej z uwzględnieniem pór roku, gradienty łatwo zmiennych składników gleby w ryzosferze. Stwierdzono trzy fazy rozwojowe ilościowo-jakościowej dynamiki elementów łatwo zmiennych w przedłużających się okresach czasu

**Słowa kluczowe:** emisje azotowe, nawożenie mineralne, uprawa sosnowa, profil gradientów, dynamika regradacji

*Alojzy Kowalkowski, Akademia Świętokrzyska, Stacja Monitoringu, ul. Świętokrzyska 15, 25-406 Kielce.*

*Halina Kopron, Zakłady Azotowe „Puławy” S.A., Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 13, 24-110 Puławy.*

## 1. Wprowadzenie

Opis pionowego rozmieszczenia substancji w glebie w zasięgu ryzosfery może dostarczyć informacji o zasobach składników odżywczych i ich zmianach pod wpływem działających z zewnątrz czynników naturalnych, a także oddziaływania człowieka w ekosystemach leśnych. W lasach stref borealnych i umiarkowanych pospolitym zjawiskiem jest akumulacja organicznego materiału na powierzchni gleby i bezpośrednio pod nią (Wessel, Tietema 1995). Ten poziom stanowi rezerwar łatwo dostępnych elementów o podstawowym znaczeniu dla wzrostu lasu i jego odnawiania (Chodak et al. 2002). Według Rode (1999) na przykład 38-58% całkowitego N, 62-67% całkowitego K i ponad 80% dostępnych dla roślin Ca i Mg zostało zakumulowane w poziomie organicznym klimaksowego dębowo-bukowego lasu rosnącego na kwaśnej glebie piaszczystej w NW Niemczech.

Obraz trwałego i zrównoważonego rozwoju gleb leśnych w naturalnym nie zmienionym ekosystemie może być skonkretyzowany i zoperacjonalizowany przez wypracowanie indykatorów umożliwiających kwantyfikację zmian w czasie i w przestrzeni (Kölling 1994, Barkmann 2002, Becker et al. 2000). Wyrowadzenie prostych indykatorów stanów środowiska ryzosfery glebowej dotąd znalazło stosunkowo małe zainteresowanie w literaturze. W tej części gleby, powstającej zawsze przy dynamicznie zmieniającej się powierzchni ziemi, w czynności jej indykacji powinny być uwzględnione oddziaływania substancjalne i strukturalne. Według Beckera et al. (2000) problem ten należy rozpatrywać w trzech płaszczyznach - źródeł, rozprzestrzenienia i przemian wraz z ich wpływami na dobra użytkowe człowieka. Dlatego niezbędne są proste metody, umożliwiające oszacowanie dynamiki przemian w profilowych układach glebo-

wych zasobów elementów niezbędnych dla funkcjonowania lasu.

Przedmiotem tego studium jest opisanie przykładowych gradientów elementów glebowych w ryzosferze, mających wpływ na regenerację lasu w obszarze wieloletniej silnej emisji azotowej w terenach Nadleśnictwa Puławy, na podstawie, badań w latach 1973-2004 (Kowalkowski 1980, 1983, Kowalkowski, Jedliczko 1996, Kowalkowski et al. 1999, Kowalkowski, Kopron 2003, 2006, Kopron 2004). Założonym celem podstawowym jest poznanie możliwości rozwoju upraw sosnowych w warunkach silnie zdegradowanych gleb i nadal trwającej emisji azotowej, przy stosowaniu zabiegów o charakterze strukturalnym i substancjalnym, kompensujących właściwości gleb.

## 2. Obiekt i metody badań

Do badań wybrano w roku 1995 powierzchnię 1,5ha gleb rdzawych bielcowych na płaskiej terasie fluwioglacjalnej, zbudowanej z różnoziarnistych piasków, przykrytej pokrywą przesegregowanych piasków eolicznych o miąższości do 135cm. Położona w oddziale 111h w odległości 1,4km NE od źródła emisji powierzchnia doświadczalna znajduje się w pobliżu punktu 2 monitoringu dynamiki właściwości łatwo zmiennych gleb pod wpływem emisji azotowej do głębokości 400cm, realizowanego w latach 1973-1983 oraz 1995-2004. Dynamikę zmian badanych cech glebowych, mierzonych w okresach jednomiesięcznych na 10 głębokościach, uśrednioną na podstawie danych wynikowych dla górnej części profilu glebowego (poziomy OI+Ofh+AhE+Bv+BvC++C1) oraz w skale macierzystej i w podłożu (C2+C3+C4+D) przedstawiono na tabeli 1. Szczegółowe opisy zmian w budowie profilu oraz metody badań przedstawiono w publikacji Kowalkowskiego i Kopron (2006).

Na powierzchni doświadczalnej w ryzosferowej warstwie gleby wyorano jesienią 1995 roku bruzdy w celu zasadzenia w nich eksperymentalnej sosny zwyczajnej jednoletniej. Dla poznania wpływu wyorania bruzd jesienią 1995 roku i późniejszych zabiegów dotyczących kompensacji nie zrównoważonego obiegu składników odżywczych dla uprawy leśnej na dynamikę ekochemicznych właściwości gleb, systematycznie w trzech porach wegetacji, pobierano uśrednione z 5 powtórzeń próbki glebowe. Dwie próbki z wyoranego z bruzdy wałka o szerokości 35cm i miąższości 20cm, z odwróconych poziomów Bv-Bhfe+AhEp i Ofhp oraz 3 próbki w dnie bruzdy, od

40cm w głąb z poziomów AhE, Bv i BvC. Próbkę glebowe do analiz pobierano w 28 terminach w miesiącach kwietniu, czerwcu i październiku od jesieni 1995 do jesieni 2004 roku. Analizy laboratoryjne wykonano w Laboratorium Działu Ochrony Środowiska Zakładów Azotowych „Puławy”.

W celu uregulowania nie zrównoważonego bilansu elementów odżywczych, mającego również wpływ na kwasowość gleby, w październiku 1995 wysiano, po wyoraniu bruzd na całą powierzchnię nawóz dolomitowy w ilości 4t.ha<sup>-1</sup>. W maju 1996 roku do bruzd, po zasadzeniu jednorocznych sadzonek sosny zwyczajnej wykonano kompensacyjne nawożenie solą potasową 60% w ilości 70kgK.ha<sup>-1</sup> na wylosowanych poletkach. W roku 1998 w maju ponownie do bruzd wysiano sól potasową 60% w ilości 40kg.K.ha<sup>-1</sup>, a w miesiącu lipcu - superfosfat w ilości 70kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> (ryc. 1A, 1B).

## 3. Ekochemiczne zmiany i stan warstwy ryzosfery w glebie przed założeniem uprawy sosnowej.

Wytworzone z piasków, przemywne gleby powierzchni doświadczalnej zostały całkowicie pozabawione przed 12-13 laty roślinności boru świeżego do suchego z wytworzeniem industriogennego, półpułstynnego zbiorowiska zaroślowego z trzcinnikiem piaskowym, wskutek bezpośrednio działającej od roku 1956 silnej emisji azotowej N-NO<sub>3</sub>, N-NH<sub>4</sub> i SO<sub>2</sub> oraz popiołów dymnicowych. Efektem tego było także silne zubożenie gleb w próchnicę oraz w jony K, Na, Ca, Mg, Fe Al i Cu (Kowalkowski 1978, 1983, Kowalkowski, Kopron 2003, 2006). O rozmiarze zmian w glebie może świadczyć fakt, że w roku 1972 w warstwie ryzosfery gleby w punkcie monitoringu Nr 2 średnie stężenie N-NH<sub>4</sub> przekraczało 240mg.100g materiału glebowego i było od 6 do 15-krotnie wyższe niż w podobnych glebach w naturalnych warunkach w odległości 28km S (Kowalkowski, Szczesny 1974).

Na powierzchni doświadczalnej zmianie uległy także elementy budowy strukturalnej w górnych 20cm profilu glebowego, wskutek co najmniej dwukrotnego wyorania bruzd w latach 1991-1995 przy podejmowanych próbach regeneracji lasu. Powstało tu zróżnicowanie płaskiego reliefu na grzędowy, z różnicami względnymi głębokości 40cm, co radykalnie zmieniło stosunki wodne i odżywcze oraz poziomową budowę profilu gleb i zniszczyło roślinność zaroślową na powierzchni do 80% (Kowalkowski et al. 1999, Kopron

Tab. 1. Zmiany stężeń składników łatwo rozpuszczalnych w glebie i w jej podłożu w odległości 1,4 km od źródeł emisji azotowej w pięcioleciach od 1973 do 2004

Tab. 1. Concentration changes of easily soluble elements in soil and subsoil in 1,4 km distance from nitrogen emission source in five year periods from 1973 to 2004

Głębokość Depth cm	Lata years	Stężenie składników łatwo rozpuszczalnych w mg.kg <sup>-1</sup> Easily soluble component concentrations in mg.kg <sup>-1</sup>								pHKCl	Ca:P	Ca:Mg	Ca:K	Ca:Nx
		N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	Nx	P	K	Ca	Mg	S					
0 – 45 gleba soil	1973-1977	28,0	58,5	86,5	1,9	19,2	66,2	12,2	.	.	34,8	5,4	3,6	0,76
	1978-1982	25,9	53,0	78,9	1,7	16,1	52,0	12,6	.	.	30,6	4,1	3,2	0,66
	1995-1999	11,0	16,9	27,9	2,6	12,1	46,5	22,1	5,0	4,07	17,9	2,1	3,8	1,67
	2000-2004	9,9	13,5	23,4	6,2	23,1	56,4	19,5	2,7	3,98	9,1	2,9	2,4	2,41
45-400 podglebie subsoil	1973-1977	24,0	26,9	50,9	0,7	17,1	40,4	7,9	.	.	57,7	5,1	2,4	0,74
	1978-1982	17,7	19,6	37,3	1,1	10,3	30,4	7,5	.	.	27,6	4,1	3,0	0,81
	1995-1999	11,8	9,3	21,1	0,6	7,7	18,0	9,4	5,5	4,60	30,0	1,9	2,3	0,85
	2000-2004	12,7	13,8	26,5	1,2	10,1	22,8	6,9	3,2	4,57	19,0	3,3	2,3	0,86

2004). Rozluźnienie gleby oraz jej pełne odsłonięcie na działanie promieni słonecznych spowodowało przyspieszenie rozkładu znajdującej się w niej butwiny i próchnicy właściwej.

Z zestawienia zmian stężeń składników łatwo rozpuszczalnych w pobliskim punkcie 2 monitoringu gleb na tab. 1 wynika, że od roku 1973 w kolejnych pięcioletnich okresach w górnej części, do głębokości 45cm aż do 4,5-krotnie zmalały stężenia N-NH<sub>4</sub> oraz podobnie -4,3-krotnie N-NO<sub>3</sub>. W dwu pięcioleciach od 1973 do 1982 zmalały także, bardzo niskie już wówczas stężenia łatwo rozpuszczalnych form P, K, Ca i Mg. W pięcioleciach 1995-2004 jednak stwierdzono ponowny wzrost tych elementów do poziomu z

lat 1973-1977, a nawet znacznie powyżej. Zauważając się stosunki Ca:P, Ca:Mg i Ca:K (tab.1) wskazują nie tylko na imisję Ca, Mg, K i P z powietrza z pyłami dymnicowymi, a przede wszystkim na postępującą w tym okresie kumulację biologiczną przez odradzające się zespoły roślinności dna lasu, pod koronami samosiewnych zarośli brzoźowych z pojedynczymi samosiewami sosny zwyczajnej. Uwagę zwraca bardzo niskie stężenie siarki, co może być wskaźnikiem niskiej imisji z powietrza i braku tego elementu w glebach wskutek wcześniejszego jego wymycia (Kowalkowski, Kopron 2005). Znacznie wzrósł natomiast stosunek Ca:N, potwierdzający malejące w glebie do głębokości 45cm średnie stężenia N-NH<sub>4</sub> i N-NO<sub>3</sub>

Tab. 2. Średnie ważone łatwo zmiennych właściwości gleb do głębokości 45 cm w okresie lat 1996-2004 w trzech porach roku i w kombinacjach uprawy sosny zwyczajnej oraz mineralnego nawożenia

Tab. 2. Mean weighed easily soluble properties of soils to the depth of 45 cm in 1996-2004 period in three year seasons and in combination of the common Pinus culture and mineral fertilization

Pora roku year season	Nawożenie mineralne Mineral fertilization	Uprawa Sosnowa Pinus culture	Wilgotność Gleby Soil Humidity %	Corg %	pH		N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	N-NH <sub>4</sub> + N-NO <sub>3</sub>	C:N	C:P
					H <sub>2</sub> O	KCl					
Przedwiośnie Early Spring	0	0	12,78	3,54	4,54	3,59	17,5	9,8	27,3	13,0	15,4
	0	+	12,26	3,57	4,35	3,73	26,9	10,5	37,4	9,5	11,9
	+	0	14,02	3,66	5,19	4,29	16,3	14,7	31,0	11,8	12,0
	+	+	14,22	3,84	5,31	4,33	19,0	15,6	34,3	12,0	12,8
Lato Summer	0	0	7,46	3,89	4,41	3,53	22,8	10,7	33,5	11,6	13,0
	0	+	6,61	2,98	4,17	3,61	18,2	7,0	25,2	11,8	13,6
	+	0	7,87	3,50	4,97	4,45	11,3	12,4	23,7	14,8	11,0
	+	+	7,51	4,20	4,86	4,20	11,5	10,3	21,8	14,3	13,6
Jesień Autumn	0	0	11,40	4,21	4,38	3,55	16,3	6,5	22,8	18,5	20,1
	0	+	10,71	3,78	4,18	3,58	15,0	6,5	21,5	17,6	15,8
	+	0	10,91	3,96	5,16	4,50	15,0	7,3	22,3	17,6	11,6
	+	+	12,14	4,28	5,14	4,23	12,4	8,0	20,4	21,0	10,0

0 - bez nawożenia i bez uprawy sosnowej: without fertilization and Pinus culture  
+ - z nawożeniem i z uprawą sosnową: with fertilization and Pinus culture

Tab. 3. Wpływ uprawy sosnowej i mineralnego nawożenia na stężenia składników łatwo rozpuszczalnych w glebie w trzech porach roku okresu 1996-2004 w warunkach emisji azotowej

Tab. 3. Influence of Pinus culture and mineral fertilization on the easily soluble element content in the soil in three year seasons of the 1996-2004 period under nitrogen emission conditions.

Pora roku year season	Nawożenie mineralne Mineral fertilization	Uprawa sosnowa Pinus culture	Stężenie składników łatwo rozpuszczalnych w mg.kg <sup>-1</sup> Easy soluble component concentration in mg.kg <sup>-1</sup>						Ca:P	Ca:Mg	Ca:K	Ca:S	P:S
			P	K	Ca	Mg	Na	S					
			Przedwiośnie Early spring	0 0 + +	0 + 0 +	2,3 3,0 3,1 3,0	33,1 24,2 36,2 43,5	82,7 100,6 214,5 211,1					
Lato Summer	0 0 + +	0 + 0 +	2,9 2,2 3,3 3,1	34,5 23,8 34,8 34,4	65,2 123,7 201,7 181,2	28,7 45,2 104,6 77,3	15,4 14,6 10,5 10,9	6,8 5,1 4,6 4,1	22,5 56,2 61,2 58,4	2,3 2,7 1,9 2,3	1,9 5,2 5,8 5,3	9,6 24,3 43,9 44,2	0,4 0,4 0,7 0,8
Jesień Autumn	0 0 + +	0 + 0 +	2,1 2,4 3,4 4,1	32,5 28,3 35,1 38,0	78,0 99,0 238,3 217,8	22,9 26,0 107,3 88,5	10,1 12,6 9,4 11,0	5,2 6,3 6,4 6,0	37,1 41,3 70,1 53,1	3,4 3,8 2,2 2,5	2,4 3,5 6,8 5,7	15,0 15,7 37,2 36,3	0,4 0,4 0,5 0,7

związane z obniżeniem ich emisji.

Także w podłożu gleb, od 45cm do 400cm znacznie niższe niż w wyżej leżącej jej części średnie stężenia N-NH<sub>4</sub> i N-NO<sub>3</sub> oraz K i Ca zmalały do pięciolecia 1995-1999 do 2,9-krotnie a w pięcioleciu 2000-2004 ponownie wzrosły. Przy bardzo niskich stężeniach, w zróżnicowaniu ilościowym do 100% zawartości P, Mg i S nie zaznaczył się żaden trend. W tej części gleby występuje wyraźna stabilizacja stężeń składników łatwo rozpuszczalnych, uzależniona od bardzo niskiej pojemności sorpcyjnej, co potwierdzają stosunki ilościowe Ca:K i Ca:N w tab.1. Według Kowalkowskiego i Jedliczki (1996) stężenia łatwo rozpuszczalnych składników odżywczych zmalały w okresie lat 1973-1983 w omawianych glebach do głębokości 40-45 cm do około 20% stanu naturalnego, a w podłożu od 45 cm do 400 cm – do około 70-80% stanu naturalnego przed działaniem azotowej emisji.

#### 4. Ekochemiczne zmiany w warstwie ryzosfery po założeniu upraw sosnowych

Długotrwała ponad 20-letnia wysoka depozycja N i S spowodowała, już wkrótce po jej inicjacji przekroczenie pojemności akumulacyjnej roślin i gleb leśnych. Te składniki ekosystemu nie były w stanie samoczynnie się zregenerować, uległy istotnym industriogennym zmianom. Tak zaawansowane skutki działania człowieka stwierdzono także w innych regionach Europy (np Nihlgard 1985, Agren i Bosatta 1988, Gundersen et al. 1998). Przerwy w emisji N i S lub jej okresowe zmniejszenia miały wprawdzie w skutku krótkotrwałe poprawy warunków kwasowości

w ekosystemach leśnych, jednak ich trwała regeneracja do wartości pH>4,2, według Beckera (2002) nie była możliwa. Jedynie szeroko zakrojone zabiegi wapnowania, według przeprowadzonych symulacji z np 3-krotnymi dawkami po 3t.ha<sup>-1</sup> mogły spowodować długotrwałe, znaczące zmniejszenie zakwaszenia gleb (Becker 2003).

Reakcję gleb powierzchni doświadczalnych z regeneracyjną uprawą sosnową na stosowane dawki wapna dolomitowego oraz na nawożenia potasowe i fosforowe przedstawimy, na podstawie dynamiki łatwo zmiennych właściwości w okresie lat 1995-2004 w 3 porach roku, na ryc.1, 2, 3 oraz tab. 2 i 3.

##### 4.1. Dynamika sezonowa łatwo zmiennych właściwości gleb

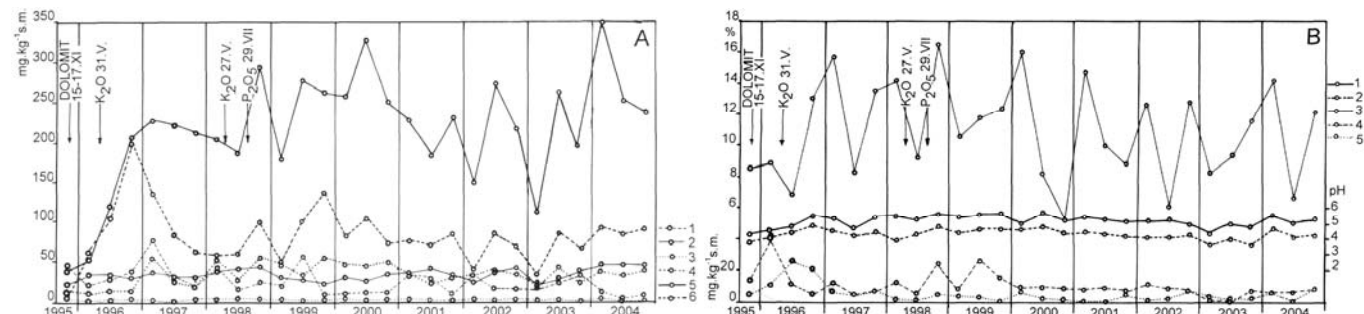
Z przebiegu linii zasobności gleb na ryc. 1 wynika, że wapnowanie dolomitом jesienią 1995 roku na całą powierzchnię, po wyoraniu bruzd, spowodowało wzrost średnich stężeń łatwo rozpuszczalnych Ca i Mg, równomierny do jesieni 1996 i następnie skokowe ich zmiany w latach następnych. O ile stężenia Mg pochodzącego z dolomitu osiągnęło jesienią 1996 roku maksimum wynoszące 199,8mg.kg<sup>-1</sup>, o tyle maksimum stężenia Ca wystąpiło wiosną 1997 roku na poziomie 252,7mg.kg<sup>-1</sup>. Do lata 1998 roku stężenia obu elementów nieregularnie malały, Ca nieznacznie do 174,1mg.kg<sup>-1</sup>, a Mg-silnie do 77,1mg.kg<sup>-1</sup>. Jesienią 1998 roku skokowo wzrosły ponownie stężenia, Ca do 283,7 a Mg do 108,3mg.kg<sup>-1</sup>. W tej fazie dynamiki, do wiosny 2002, w poszczególnych porach roku skokowo zmieniały się stężenia, Ca od 337,2 do

Ryc. 1. Dynamika średnich ważonych łatwo zmiennych właściwości gleb nawożonych w trzech porach roku, w okresie od jesieni 1995 do jesieni 2004 w strefie ryzosfery regeneracyjnej uprawy sosnowej w zasięgu emisji azotowej.

Objaśnienia: A1 –  $\Sigma N$ , 2 – Corg., 3 – P, 4 – K, 5 – Ca, 6 – Mg, B1 –  $pH_{H_2O}$ , 2 –  $pH_{KCl}$ , 3 – wilgotność, 4 – Na.

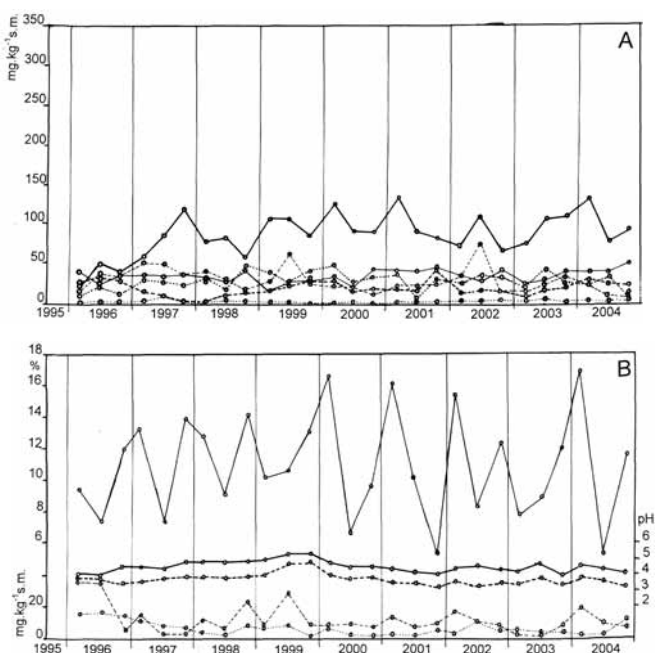
Fig. 1. Dynamics of mean weighed easily changeable properties in fertilized soils in three seasons of the year from autumn 1995 to the autumn 2004 in rhizosphere zone of the regenerated Pinus culture in the reach of nitrogen emission.

Explanation: A1 –  $\Sigma N$ , 2 – Corg., 3 – P, 4 – K, 5 – Ca, 6 – Mg, B1 –  $pH_{H_2O}$ , 2 –  $pH_{KCl}$ , 3 – humidity, 4 – Na.



119,8mg.kg<sup>-1</sup> z trendem malejącym, także Mg z wahaniami wielkości stężeń od 175,8 do 57,4mg.kg<sup>-1</sup>.

Nowy stan dynamiki obu elementów powstaje od lata 2002, z tendencją wzrostu średnich stężeń rozpatrywanych elementów, trwający do jesieni 2004 roku, Ca do maksymalnie 367mg.kg<sup>-1</sup> i Mg do 140mg.kg<sup>-1</sup>, jednak z bardzo dużymi amplitudami między poszczególnymi porami, do 146mg.kg<sup>-1</sup> dla Ca i do 83,1mg.kg<sup>-1</sup> dla Mg.



Ryc. 2. Dynamika średnich ważonych łatwo zmiennych właściwości gleb w trzech porach roku bez nawożenia w okresie od jesieni 1995 do jesieni 2004 w strefie ryzosfery regeneracyjnej uprawy sosnowej w zasięgu emisji azotowej.

Objaśnienia: jak dla A i B na ryc. 1.

Fig. 2. Dynamics of mean weighed easily changeable properties in unfertilized soils in three year seasons from autumn 1995 to the autumn 2004 in rhizosphere zone of the regenerated Pinus culture under the influence of nitrogen emission.

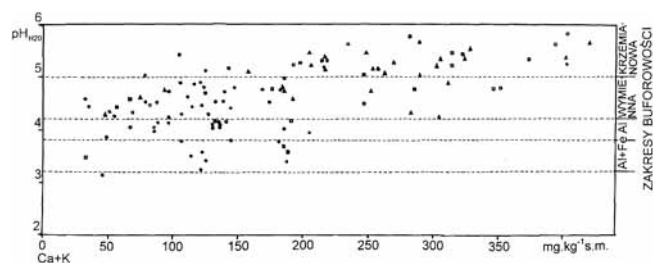
Explanations: as for A and B on Fig. 1.

Podobne fazowe zróżnicowanie wystąpiło w średnich stężeniach N-mineralnego w badanych glebach nawożonych. Najwyższe stężenia sumy N-NH<sub>4</sub>+N-NO<sub>3</sub> wynoszące średnio 42,2mg.kg<sup>-1</sup> wystąpiły w okresach od jesieni 1996 do lata 1998, z przewagą N-NH<sub>4</sub> wynoszącą 23,0mg.kg<sup>-1</sup>, a także stosunkowo wysokim stężeniem N-NO<sub>3</sub> wynoszącym 19,2mg.kg<sup>-1</sup>. W następnej fazie, od jesieni 1998 do wiosny 2002 średnia suma N mineralnego była znacznie niższa - 20,7mg.kg<sup>-1</sup>, ze stężeniem N-NH<sub>4</sub> średnio wynoszącym 6,9mg.kg<sup>-1</sup>, znacznie wyższe było stężenie N-NO<sub>3</sub> wynoszące średnio 13,9mg.kg<sup>-1</sup>. Najniższe stężenia N wynoszące średnio 18,7mg.kg<sup>-1</sup> wystąpiły w okresie od lata 2002 do jesieni 2004. W tej fazie znacznie zmalało średnie stężenie N-NO<sub>3</sub> do 6,9mg.kg<sup>-1</sup>, znacznie wyższe było stężenie N-NH<sub>4</sub> - średnio wynoszące 11,8mg.kg<sup>-1</sup>. W okresie badań zmalało w glebie do głębokości 45cm stężenie N-NO<sub>3</sub>. Dynamika zawartości N-NH<sub>4</sub> była jednak wyraźnie uzależniona od emisji. Maksymalne amplitudy odchyłek stężeń N-NH<sub>4</sub> w glebach wynosiły od 35,4 do 1,6mg.kg<sup>-1</sup>, a N-NO<sub>3</sub> od 47,5 do 1,6mg.kg<sup>-1</sup> w poszczególnych badanych porach roku.

Zastosowane nawożenie P-PO<sub>4</sub> spowodowało trwałe wzrost średnich stężeń łatwo rozpuszczalnych form P, we wstępnej fazie do lata 1998 wynoszących średnio 3,43mg.kg<sup>-1</sup>. W fazie drugiej, do wiosny 2002 zmalało ono do 2,76mg.kg<sup>-1</sup> i następnie wzrosło w fazie trzeciej do średnio 4,34mg.kg<sup>-1</sup> przy malejących wartościach pH (Kowalkowski, Kopron 2006).

Również łatwo rozpuszczalny K wykazał niewielkie zróżnicowanie średnich stężeń w okresie badań, wynoszących we wstępnej fazie 33,1mg.kg<sup>-1</sup>, a fazie drugiej -39,1mg.kg<sup>-1</sup> i w fazie trzeciej -36,8mg.kg<sup>-1</sup>. Między porami roku wystąpiły jednak znaczne różni-

ce stężeń, od maksymalnego 66,7 do minimalnego 12,4mg.kg<sup>-1</sup>. Uwagę zwracają jednak malejące średnie stężenia S-SO<sub>4</sub>, od 7,6mg.kg<sup>-1</sup> w fazie wstępnej do 1,88mg.kg<sup>-1</sup> w fazie drugiej i 2,1mg.kg<sup>-1</sup> w fazie trzeciej. Ogólnie jednak stężenia zasadowych elementów miały wpływ na kształtowanie dynamiki wartości pH w omawianych glebach (ryc.3).



Ryc. 3. Zależność między średnią ważoną wartością Ca+K (mg.kg<sup>-1</sup>) łatwo rozpuszczalnych a pH<sub>H<sub>2</sub>O</sub> w okresie od jesieni 1995 do jesieni 2005 w strefie ryzosfery do głębokości 45cm z uwzględnieniem zakresów buforowości pH<sub>H<sub>2</sub>O</sub> w regeneracyjnej uprawie sosnowej w zasięgu emisji azotowej.

Fig. 3. Interdependence between mean weighed Ca+K (mg.kg<sup>-1</sup>) easily soluble content and the pH<sub>H<sub>2</sub>O</sub> of the period from autumn 1995 to the autumn 2004 in the rhizosphere zone to 45cm depth under regard of the pH<sub>H<sub>2</sub>O</sub> buffering reach in regenerated Pinus culture under the influence of nitrogen emission.

Zawartości wody w badanych glebach nawożonych wykazały dużą dynamikę sezonową, uzależnioną głównie od rozmieszczenia opadów w porach roku. W wyróżniających się trzech fazach dynamiki łatwo rozpuszczalnych elementów średnie wilgotności gleb były jednak podobne, odpowiednio 12,5, 10,7 i 10,8%. Nie mniej między poszczególnymi porami roku wystąpiły znaczne różnice średnich wilgotności, od 18,6 do 2,2% (ryc.1B). Szczególnie suche były okresy lata w roku 2000, 2002 i 2004 oraz jesieni w roku 2000. Najbardziej wilgotne były okresy wiosny 1997 i 2000 oraz jesień 1998 roku. Z maksimami i minimami średnich wilgotności badanych gleb nawożonych nie zawsze były w związku stężenia łatwo zmiennych składników gleby.

Na powierzchniach nie nawożonych, jak można wnioskować z ryc.2A i 2B, w przeciwieństwie do gleb powierzchni nawożonych (ryc.1A, 1B), dynamika łatwo zmiennych składników wyraźnie zależała od przebiegu wilgotności gleb. Jest ona więc zależna od rozmieszczenia opadów w porach roku. Wyraźnie zaznaczające się na powierzchniach nawożonych trzy fazy dynamiki są mniej zaznaczone w glebach powierzchni nie nawożonych. Średnie wilgotności gleb

do głębokości 45cm wynoszące 10,4% w okresie od jesieni 1996 do lata 1998, 10,6% w okresie od jesieni 1998 do wiosny 2002 i 10,7% od lata 2002 do jesieni 2004 nieznacznie się różnią od gleb nawożonych. Jednak średnie sumy N-NH<sub>4</sub>+N-NO<sub>3</sub> w poszczególnych fazach dynamiki były wyższe, w fazie wstępnej 44,9mg.kg<sup>-1</sup>, w drugiej 22,5mg.kg<sup>-1</sup> i w trzeciej 21,1mg.kg<sup>-1</sup>, z wyraźną tendencją do malenia w okresie badań. W sumie N mineralnego znaczną 2-3krotną stężeń przewagę posiadał N-NH<sub>4</sub> nad N-NO<sub>3</sub>. Między porami roku wahania średnich stężeń N były duże, od 3,4 do 73,8mg.kg<sup>-1</sup>.

Średnie stężenia Ca i Mg w glebach do głębokości 45cm na nie nawożonych powierzchniach (ryc.2A) były niskie, w okresie od jesieni 1996 do lata 1998 wyniosły odpowiednio 73,1 i 20,2mg.kg<sup>-1</sup>, od jesieni 1998 do wiosny 2002 wynosiły 94,8 i 34,4mg.kg<sup>-1</sup> oraz od lata 2002 do jesieni 2004 odpowiednio 93,3 i 18,7mg.kg<sup>-1</sup>. Między porami roku różnice średnich stężeń obu elementów były znaczne, od 16,7 do 121,0mg.kg<sup>-1</sup> dla Ca oraz od 1,0 do 70mg.kg<sup>-1</sup> dla Mg. Bardzo niskie były średnie stężenia łatwo rozpuszczalnego P, w kolejnych fazach od 2,2 do 3,6 i 2,8mg.kg<sup>-1</sup>, ze znacznymi różnicami stężeń w porach roku od 0,1 do 7,0mg.kg<sup>-1</sup>.

Średnie stężenia K między poszczególnymi fazami dynamiki były na powierzchniach nie nawożonych zróżnicowane, podobnie jak Ca, od 14,6 do 40,7mg.kg<sup>-1</sup> i następnie do 27,6mg.kg<sup>-1</sup>. To znaczy, że w okresie od jesieni 1998 do wiosny 2002 wystąpiła znaczniejsza depozycja K wraz z Ca i Mg w pyłach dymnicowych. Depozycja ta była nierównomierna w czasie, gdyż różnice skrajnych średnich stężeń K łatwo rozpuszczalnego były bardzo duże, od 1,8 do 119,8mg.kg<sup>-1</sup>. Przyczyną tego zjawiska mogło być, oprócz pobierania przez rośliny oraz wymywania także zarówno występowanie gradientów ciśnieniowo-temperaturowych w powietrzu atmosferycznym związanych z sytuacją geomorfologiczną (Kowalkowski, Jedliczko 1996), jak też przenoszenie pochodzących z pobliskiego źródła emisji chmur pyłowych o dużym stężeniu przez wiatry (Kowalkowski et al. 1999).

Także różnice stężeń S-SO<sub>4</sub> w poszczególnych porach były bardzo duże, od śladowych do 13,9mg.kg<sup>-1</sup>, co jest potwierdzeniem uzależnienia depozycji tego związku także od działania wiatrów. Podobnie jak w przypadku stężeń N łatwo rozpuszczalnego, stężenia S-SO<sub>4</sub> na powierzchniach nie nawożonych były znacznie wyższe niż na nawożonych. Mały jednak

od okresu jesieni 1996-lato 1998 ze średnimi stężeniami  $7,9\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  do  $3,7\text{ mg}$  w okresie od jesieni 1998 do wiosny 2002 i do średnio  $3,4\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  w okresie od lata 2000 do jesieni 2004. Zróżnicowanie średnich stężeń S-SO<sub>4</sub> w poszczególnych porach roku było dlatego bardzo duże.

Badania dynamiki zawartości C organicznego do głębokości 45cm wykazały wzrost w okresie badań o około 1 do 1,5%, nieco większy na powierzchniach nawożonych niż na nie nawożonych (ryc. 1A i 2A).

#### **4.2. Wpływ nawożenia i uprawy sosnowej na łatwo zmienne właściwości gleb w porach roku**

W umownie przyjętych trzech porach roku i powtarzalnych w okresie badań terminach pobierania próbek glebowych do analiz laboratoryjnych (Kowalkowski, Jedliczko 1996, Kowalkowski et al. 1999, Kowalkowski, Kopron 2006) uzyskane w 28 terminach średnie wyniki stanów łatwo zmiennych właściwości gleb od jesieni 1995 do jesieni 2004 przedstawione na tab.3 i 4 należy rozpatrywać jako wypadkową zespołu procesów glebowych uruchomionych po zastosowaniu orki, nawożeń, zasadzenia sosny, depozycji wyemitowanych do powietrza substancji przez pobliskie i dalekie emitory oraz warunków atmosferycznych.

Głównym czynnikiem zróżnicowania wilgotności gleb jest rozmieszczenie opadów atmosferycznych w porach roku, z najwyższymi, średnimi w okresach przedwiośnia, najniższymi w okresie lata i pośrednimi podczas jesieni (tab.2). Na to zróżnicowanie wilgotności nakłada się, we wszystkich badanych porach roku, zwiększające wilgotność nawożenie mineralne, największe w okresach przedwiośnia, średnio o 1,2 do 1,5%. Uprawa sosnowa bez nawożenia gleb spowodowała zmniejszenie wilgotności, szczególnie w okresie wegetacyjnym. Na powierzchni nawożonej z sosną wilgotność była większa, szczególnie w okresie przedwiośnia i jesieni.

Nawożenie na ogół spowodowało zwiększenie zawartości Corg. w glebach, głównie na powierzchniach z uprawą sosnową w okresie jesieni i przedwiośnia. Pod uprawą sosnową bez nawożenia występuje w okresie wegetacyjnym (lato) zmniejszenie wilgotności gleby, co także zaznacza się w okresie jesieni. We wszystkich kombinacjach, po okresie jesieni-przez zimę i przedwiośnie należy w glebach zawartość Corg. Jest to efekt chemicznego rozkładu materii organicznej przez N-mineralny pochodzący z imisji. Produkty tego procesu są wymywane w głąb gleby przez za-

kwaszone wody roztopowe i opadowe nasycone związkami N mineralnego i S-SO<sub>4</sub>.

Nawożenie mineralne zwiększyło wartości pH we wszystkich porach roku, bardziej w okresie jesieni i przedwiośnia. Uprawa sosnowa bez nawożenia spowodowała obniżenie wartości pH w glebie i zawężenie różnic między  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$  i  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  do 0,50-0,60 jednostki pH. Nawożona uprawa sosnowa natomiast zwiększyła wartości pH gleby przez zimę do okresu przedwiośnia, latem i jesienią natomiast niewielkie obniżenie, z większymi różnicami między  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$  i  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  od 0,83 do 0,95 jednostki. Według Backesa (1993) oraz Wolff i Rieka (1999) różnica między  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$  i  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  przy wartościach  $\text{pH}_{\text{KCl}} > 4,2$  wynosi 0,6 jednostki i jest prawie stała. Przy  $\text{pH}_{\text{KCl}} < 4,2$  rośnie i przy  $\text{pH}_{\text{KCl}} < 3,0$  osiąga 0,8 jednostki pH. Jak wynika z zestawienia  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$  i  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  badanych gleb na tab.3 zasada ta nie sprawdza się w warunkach zakłóconego przez nadmiarowe ilości N mineralnego bilansu kationowo-anionowego. Tego wyrazem są stosunkowo wąskie i zróżnicowane stosunki Corg.: N min., od 9,5 do 13,0 w okresie przedwiośnia, od 11,6 do 14,8 w okresie lata i od 17,6 do 21,0 w okresie jesieni, wskazujące także na różne stężenia w glebie N mineralnego pochodzącego z depozycji atmosferycznej w porach roku. Szersze stosunki C:N w okresie jesieni, przy najniższym stężeniu w glebie sumy N-NH<sub>4</sub>+N-NO<sub>3</sub> są rezultatem nagromadzenia w glebie obumarłych organów roślin.

Zastosowane nawożenie mineralne dolomitem, solą potasową i superfosfatem w okresie lat 1995-1998 w badanych porach roku znacząco zwiększyło zasoby łatwo rozpuszczalnych Ca i Mg oraz niewiele - K i P, a także zmniejszyło następnie zasoby Na i S-SO<sub>4</sub>, w porównaniu z powierzchniami nie nawożonymi (tab.3). Uprawa sosnowa zwiększyła w glebach nie nawożonych zasobność łatwo dostępnego Ca i Mg we wszystkich porach roku, a zasobność P, Na i S-SO<sub>4</sub> w okresie przedwiośnia i jesieni. Zmniejszeniu uległa zawartość K we wszystkich porach roku. W uprawie sosnowej nawożonej gleby były natomiast, w porównaniu z nie nawożoną uprawą sosnową, uboższe w łatwo dostępny Ca we wszystkich porach roku, Mg- w okresie lata i jesieni. Większa natomiast była zasobność K w okresie przedwiośnia i jesieni w glebach nawożonych z uprawą sosnową. Również jesienią w glebach nawożonych z uprawą sosnową wyższa była zasobność łatwo rozpuszczalnego P niż w glebach nawożonych bez uprawy sosnowej.

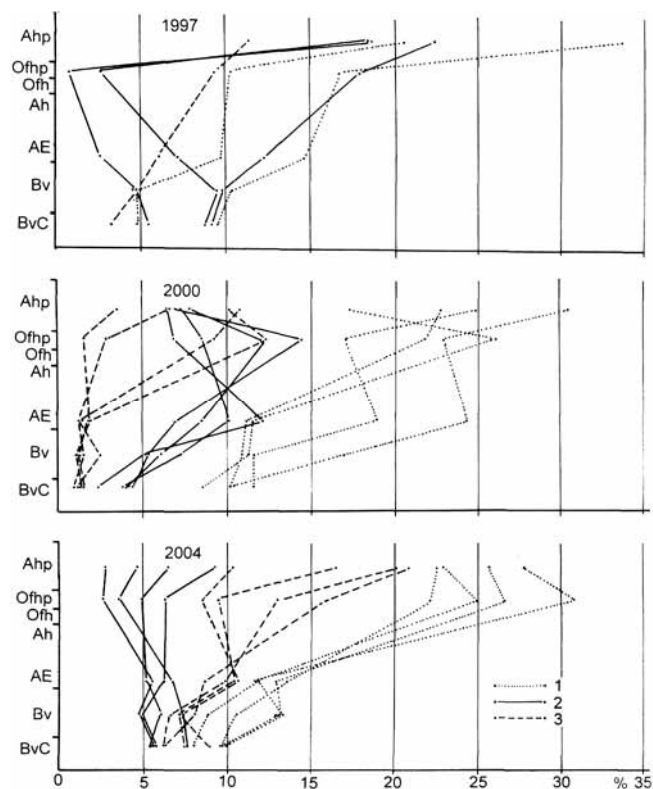
Przedstawione różnice są rezultatem wzrastającego z wiekiem uprawy sosnowej zapotrzebowania na składniki odżywcze oraz wzrastające ich wiązanie w nadziemnych i podziemnych organach roślin. W przypadku ich niedoborów na powierzchniach nie nawożonych pod uprawami sosnowymi, wskutek wzrostu zakwaszenia, następował przyspieszający się rozkład glebowych minerałów pierwotnych i wtórnych na drodze czysto chemicznej, a także dzięki enzymom wydzielanym przez grzybnie ektomikoryz.

W warunkach imisji N i S-SO<sub>4</sub> zasoby znajdujących się obiegu elementów odżywczych mogą ulegać zwiększeniu wskutek wymywania ich z nadziemnych organów roślin, w przypadku sosny należą do nich także kwasotwórcze związki organiczne (Kowalkowski 1992, Kozłowski 2002, Kowalkowski et al. 1992). W przypadku gospodarki fosforowej wiadomo, że wysokie stężenia Ca w glebach powodują wytrącanie bardzo trudno rozpuszczalnych fosforanów wapnia. W silnie kwaśnych środowiskach glebowych z okresowo występującymi wartościami pH < 4,0 powstają również trudno rozpuszczalne fosforany Al i Fe. Najkorzystniejsza dostępność zasobów P w glebie powstaje w umiarkowanym kwaśnym zakresie pH 4-6 (Ulrich et al. 1979, Schinner, Sonleitner 1996, Wolff, Riek 1999, Kowalkowski, Kopron 2006).

## 5. Gradienty łatwo zmiennych składników gleby w ryzosferze

Opis pionowego rozmieszczenia w profilu glebowym substancji i związków dostarcza informacji o obiegu, magazynowaniu i przetwarzaniu składników odżywczych w określonych warunkach wilgotności i kwasowości. Szczególne znaczenie dla udatności upraw leśnych w początkowym okresie istnienia strukturalnie przekształconego profilu glebowego, ma rozmieszczenie gradientów tych składników w zasięgu ryzosfery, do przeciętnej głębokości 45cm (Chodak et al. 2002, Kowalkowski, Kopron 2006). Według Kuzyakowa (2002) nadwyżka łatwo dostępnego Corg i szczególnie ostro limitacja składników odżywczych, są czynnikami wytwarzającymi lokalne środowiska w ryzosferze, ostro różne od części gleby nie przerośniętej korzeniami. Na przykładzie linii głębokościowych przebiegów wilgotności w ryzosferze oraz zasobności w niej łatwo rozpuszczalnych form Ca, Mg i K w trzech porach roku przedstawimy ewolucję ich gradientów z upływem czasu, od przeprowadzenia czyn-

ności zakładania sosnowych upraw regeneracyjnych (ryc.4, 5, 6).

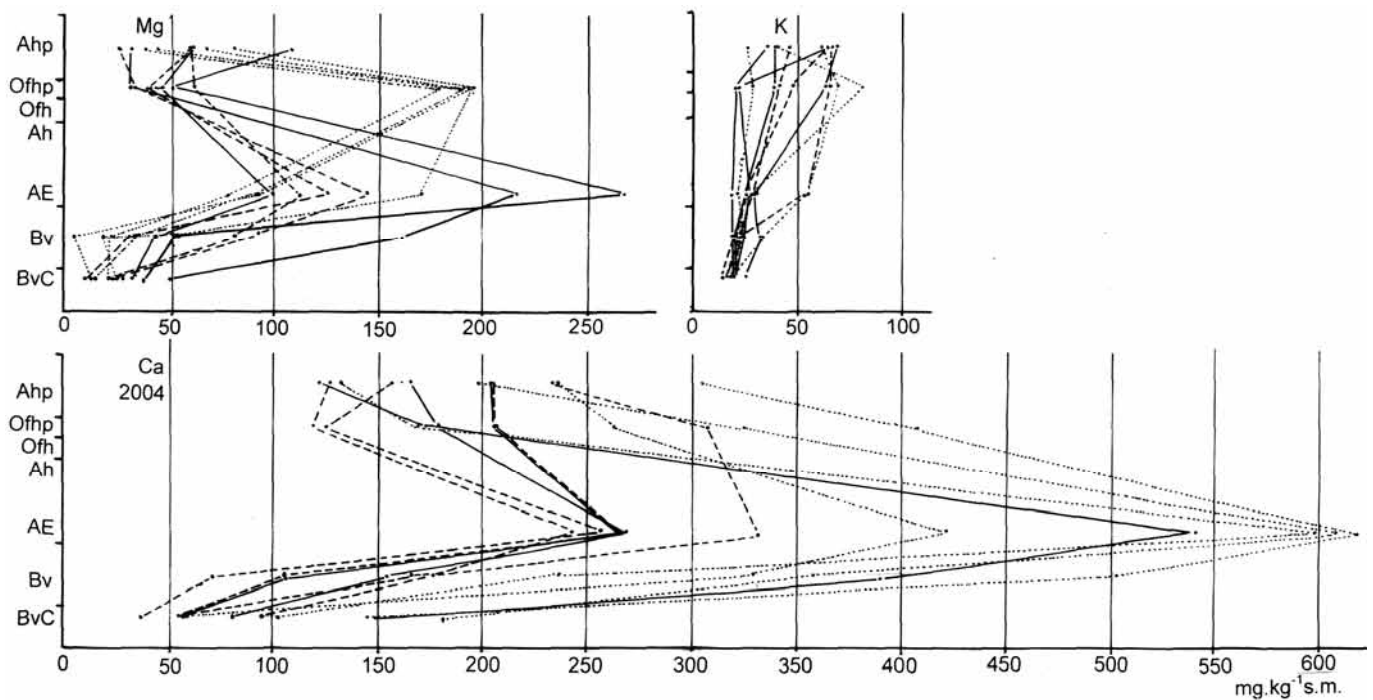


Ryc. 4. Porównanie przebiegów linii głębokościowych z pionowymi gradientami średnich wilgotności w porach roku lat 1997, 2000 i 2004 w warstwie ryzosfery gleb rdzawych bielcowych wytworzonych z pokrywowych piasków eolicznych.

Pory roku: 1 – przedwiośnie, 2 – lato, 3 – jesień  
 Fig. 4. Comparison of depth lines run with vertical gradients of the mean soil humidity in the year seasons of 1997, 2000, 2004 in the rhizosphere zone of the rusty podzolic soils developed from eolic cover sands.  
 Seasons of the year: 1 – early spring, 2 – summer, 3 – autumn

Z układów profilowych linii wielkości wilgotności gleb, z w górnej części profilu wyoranymi bruzdami o łącznej głębokości 40cm, wnioskujemy, iż głównym źródłem wody dla roślin jest część gleby wznosząca się po obu stronach nad dnem bruzdy. Zasoby wody maleją w głąb ryzosfery tym bardziej, im większa jest wilgotność górnej części gleby (ryc.4). Linie głębokościowe wilgotności są tym bardziej wychylone w lewo im większa jest wilgotność, stają się tym bardziej pionowe im mniejsza jest w glebie zasobność wody. W roku 2004 największe różnice wilgotności, w badanych glebach dochodzące do 28%, stwierdzono w poziomach Ahp i Ofhp, najmniejsze, do 5% w poziomie BvC na głębokości 40-45cm. W poszczególnych latach bardzo wyraźnie zaznaczają się pory roku o





Ryc. 5. Przebiegi linii głębokościowych z gradientami średnich zawartości łatwo rozpuszczalnych form Ca, Mg, K w roku 2004 w warstwie ryzosfery w porach roku (objaśnienie jak na ryc. 4.)

Fig. 5. Depth lines run with gradients of the mean content of easily soluble forms of Ca, Mg and K in year 2004 seasons in rhizosphere zone (the seasons of the year as in Fig. 4.)

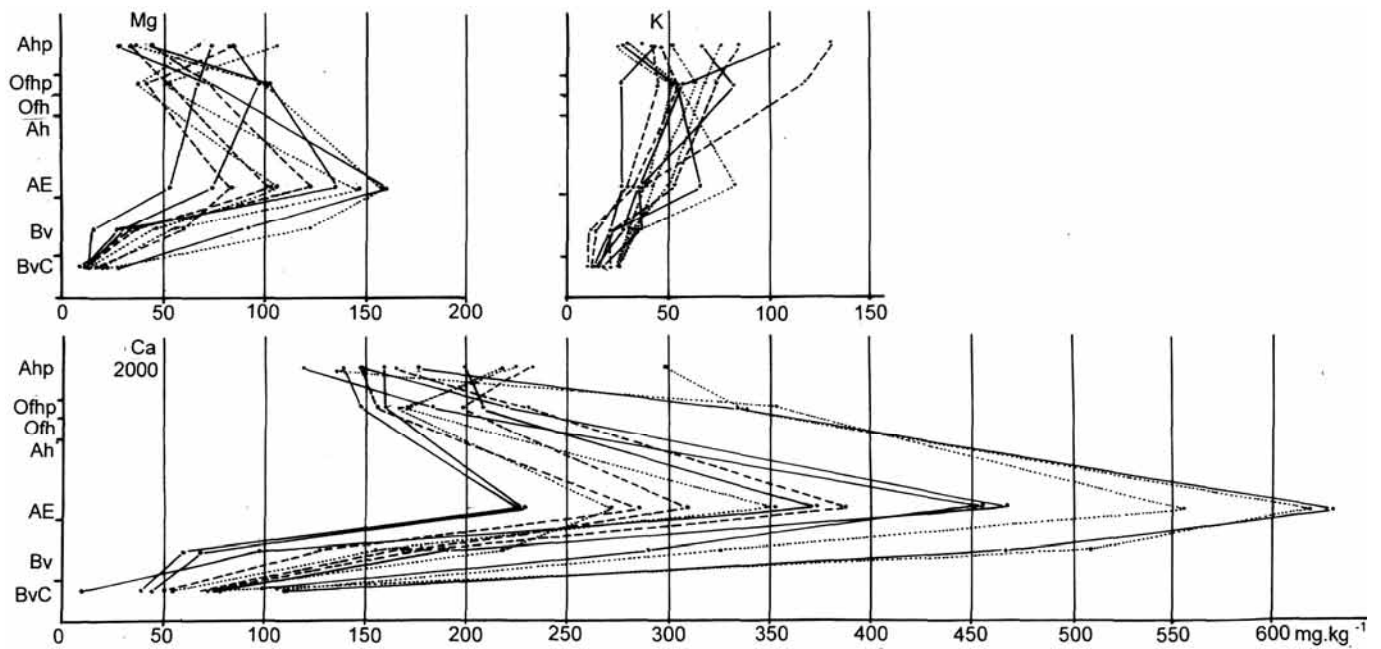
charakterystycznych średnich wilgotnościach, zazwyczaj wiosna z dużą wilgotnością gleby, suche lato, pośrednia wilgotność jesienią. W roku 2000 po wilgotnej wiosnie wystąpiło suche lato i jesień z bardzo niskimi wilgotnościami gleb.

Porównanie przebiegów linii głębokościowych wilgotności gleb w latach 1997, 2000 i 2004 na ryc. 4. wskazuje na ich ewolucję, od chaotycznego układu w roku 1997 zdestabilizowanego jeszcze przez oddziaływanie strukturalne na glebę w roku 1995, do ustabilizowanego podziela na 3 układy -przedwiosenny, letni i jesienny, powtarzalne na różnych powierzchniach w roku 2004. Na badanej głębokości 45cm widoczne są dwie lokalizacje gradientów wilgotności, górny w poziomie Ofhp na głębokości +5-0cm oraz dolny w poziomach Ahe i Bv w bruzdzie, na głębokościach od 5 do 40cm. Górny gradient jest labilny od wysokich do bardzo niskich wilgotności, uzależniony od kształtowania się warunków pogodowych. Dolny gradient natomiast charakteryzuje się stabilnością, o niewielkich w roku wahaniami wielkości, z możliwością lokalizacji na różnych głębokościach od 5 do 40cm poniżej dna bruzdy.

Nieporównywalny z profilowym układem linii głębokościowych wilgotności gleb jest przebieg linii

głębokościowych zasobności badanych gleb w łatwo rozpuszczalne elementy. odżywcze, przykładowo przedstawionych dla Ca, Mg i K w latach 2004 i 2000 na ryc. 5 i 6. Ich charakterystyczną cechą jest dominacja gradientu zawartości tych elementów bezpośrednio pod powierzchnią gleby w wyoranej bruzdzie do głębokości 15-20cm, na której we wszystkich porach roku wilgotność gleby jest stosunkowo niska (ryc. 4). W roku 2004, po upływie 8 lat od terminu założenia uprawy sosnowej, widoczne już są sezonowe uzależnienia tego zlokalizowanego w poziomie AE gradientu od pór roku. Tu powstają największe gradienty łatwo rozpuszczalnego Ca w okresie przedwiośnia w wilgotnej glebie oraz najmniejsze podczas lata i jesieni, w suchej i średnio wilgotnej glebie. W przypadku Mg występują dwa maksima gradientu - wiosenne w poziomie Ofhp oraz letnie i jesiennie w poziomie AhE.

Łatwo rozpuszczalny K nie wykazuje jednoznacznego uporządkowania linii głębokościowej jego zawartości w porach roku. W roku 2004, w porównaniu z rokiem 2000, stwierdzono znaczny ubytek tego elementu na całej badanej głębokości profilu, czego wyrazem są przesunięte w kierunku zera linie zasobności. Wielkości gradientów na linii głębokościowej zasobności Ca w tym roku były w zasadzie podobne



Ryc. 6. Przebiegi linii głębokościowych z gradientami średnich zawartości łatwo rozpuszczalnych form Ca, Mg i K w roku 2000 w warstwie ryzosfery w porach roku (objaśnienie jak na ryc. 4.)

Fig. 6. Depth lines run with gradients of the mean content of easily soluble forms of Ca, Mg, and K in the 2000 year seasons in rhizosphere zone (the seasons of the year as at Fig. 4)

do roku 2000. W poszczególnych porach roku 2000 jednak układy tych linii były chaotyczne a w roku 2004 wyraźnie uporządkowane. W przypadku Mg także zarysowują się dwa gradienty w przebiegu linii głębokościowej zawartości bez uporządkowania, w porach roku. Stwierdza się zatem pewną stabilizację zasobności elementów odżywczych w badanych glebach w roku 2004, w roku 2000 cecha ta jeszcze nie jest zaznaczona. Znaczne zmniejszenie w roku 2000 wielkości gradientów zasobności Mg w porównaniu z rokiem 2004 może być następstwem wystąpienia długotrwałej suszy w okresie lata i jesieni, która także mogła być przyczyną chaosu w układzie linii głębokościowej zasobności.

## 6. Podsumowanie

W najbliższym sąsiedztwie dużych emiterów las łącznie z glebami staje się systemem filtrującym i buforującym depozycję emitowanych gazów, pyłów i roztworów. Przekroczenie pojemności akumulacyjnej roślin i gleb wiedzie do katastrofalnego niezrównoważenia w ekosystemie. Samoczynna regeneracja takiego ekosystemu jest albo długotrwała albo nie możliwa. W takiej sytuacji konieczne są intensywne i agresywne w stosunku do ekosystemu czynności strukturalne zmieniające budowę przy powierzchniowej części profilu

glebowego oraz czynności zmieniające substancjalne cechy chemiczne w profilu glebowym.

W ekosystemie leśnym boru świeżego w Nadleśnictwie Puławy, zniszczonym przez silne i długotrwałe emisje azotowe, przygotowano glebę przez wyoranie bruzd, założono uprawę sosnową oraz zastosowano kompensacyjne nawożenie mineralne wapniowe, magnezowe, potasowe i fosforowe. Nawożenie było substancjalnym zabiegiem tworzenia lokalnego środowiska glebowego umożliwiającego w zasięgu ryzosfery rozwój korzeni sadzonek sosny. Jednocześnie także środowiska sprzyjające zrównoważeniu zaspokojenia potrzeb wodnych i odżywczych tak dalece, ażeby nadziemne organy drzewek sosny stworzyły i z czasem zwiększały pojemność akumulacyjną adekwatną do niezrównoważonej depozycji azotowej, pozwalającą przetrwać presję na nie agresywnych związków chemicznych. Wprowadzone do takiego środowiska glebowego rośliny, poprzez swoje systemy korzeniowe, powinny w możliwie najkrótszym okresie czasu osiąść zdolność takiego oddziaływania na glebę, ażeby powstały w niej dostosowawcze procesy przemian, które można odnieść do tak zwanego fenomenu *priming effect* (PE), opisywanego między innymi przez Jenkinsona (1966) i Kuzyakowa (2002).

Na podstawie uzyskanych wyników dziesięcioletnich badań (1995-2004) można stwierdzić, że zmiany

strukturalne w górnej części ryzosfery spowodowały zmianę jednogradentowej, lewo- lub prawoskrętnej linii przebiegu głębokościowego łatwo zmiennych właściwości glebo-ekologicznych na dwugradientową w przypadku wilgotności, oraz na silnie załamana podwójnie lewoskrętną, jednogradentową linię głębokościową zasobności gleb w składniki odżywcze. Kształt i lokalizacja linii głębokościowych w początkowym okresie badań były nieregularne i chaotyczne w poszczególnych porach roku. Stosunkowo szybko, już po upływie 5-6 lat pojawiają się nowo ukształtowane linie z wyraźnie rysującymi, powtarzającymi się głębokościami lokalizacji i wielkości gradientów.

Względnie wąskie stosunki C:N w strefie ryzosfery, są wskaźnikami przeładowania gleboekologicznych procesów transformacyjnych przez atmorene depozycje azotu amonowego i azotanowego, S-SO<sub>4</sub> i pyłów dymnicowych bogatych w łatwo rozpuszczalne związki Ca, Mg, K, S. Według Wolff i Rieka (1999) bardzo bogate zaopatrzenie w N z depozycji atmorenej skutkuje na kwaśnych z natury glebach zwiększeniem produkcji biomasy (efekt nawożenia), co stwierdza się także na omawianych powierzchniach badawczych. W ten sposób pośrednio przyspieszają się procesy zubożenia gleb z zasadowych elementów, a jednocześnie silnie wzrasta masa bogatego w N mineralny odpadu organicznego na powierzchni gleby, destabilizującego stosunki jonowe w glebie.

Wprowadzone na powierzchnię gleby mineralne nawozy Ca, Mg, K i P-PO<sub>4</sub> spowodowały natychmiastowe, po upływie 6 miesięcy istotne zmiany ilościowo-jakościowe dostępnych dla roślin składników odżywczych, przede wszystkim zmniejszenie stężeń w glebie nadmiarowych N i S pochodzących z bieżących depozycji. Podwyższone lub obniżone zawartości tych elementów ustabilizowały się po upływie 2 lat. Z czasem jednak, szczególnie w przypadkach wysokich stężeń, np Ca i Mg wzrastały sezonowe odchyłki ich zawartości, wskazujące na postępujące ich wyczerpywanie w okresie wegetacyjnym i niepełne uzupełnianie podczas jesieni i zimy. Na podstawie wyróżnionych trzech faz dynamiki składników łatwo zmiennych w badanych glebach stwierdzono malejące w czasie szybkości przemian dostosowawczych przebiegających w zdestabilizowanych warunkach ryzosfery, do głębokości 45cm.

Uprawy sosnowe 8-letnie nie nawożone i nawożone wpłynęły różnicująco na środowisko ryzosfery w warunkach działającej depozycji azotowej. Po upływie 8 lat uprawa sosnowa baz nawożenia spowodowa-

ła w ryzosferze zmniejszenie wilgotności, zawartości Corg i łatwo rozpuszczalnych P i K oraz zwiększenie zasobności Ca, Mg i Na, w porównaniu z glebami nawożonymi i bez sosny. W glebach nawożonych z sosną wzrosły zasoby Corg. i K, zmalały w porównaniu z glebami nawożonymi bez sosny wartości pH oraz zawartości Ca, Mg, S.

Okres 9 lat badań, pomimo stwierdzenia zarysowujących się różnicujących trendów procesów dostosowawczych w ryzosferze, jest za krótki dla jednoznacznego wnioskowania o ich ostatecznym rezultacie.

**Podziękowanie.** Badania zostały zrealizowane w Dziale Ochrony Środowiska Zakładów Azotowych „Puławy” S.A., dzięki sfinansowaniu w latach 1995-2004 projektu „Monitoring środowiska leśnego pod wpływem emisji przemysłowych w otoczeniu Zakładów Azotowych „Puławy”, podtemat 4a – „Badania gleb na powierzchniach upraw regeneracyjnych”.

## 7. Literatura

- Agren G.J., Bosatta E., 1988:** *Nitrogen saturation of terrestrial ecosystems.* Environmental Pollution 54: 185-197.
- Backes J., 1993:** *Aufbau eines Waldbodeninformationssystems und Ergebnisse der Saarländischen Waldbodeninventur.* Saarbrücken.
- Barkmann J., 2002:** *Modellierung und Indikation nachhaltiger Landschaftsentwicklung.* Beiträge zur Ökosystemforschung. EcoSys 9: 1-161.
- Becker R., Block J., Schimming C. G., 2000:** *Critical Loads für Waldökosysteme-Methoden und Ergebnisse für Standorte des Level II-Programmes.* BML Bonn: 3-17.
- Becker R., 2002:** *Dynamische Modellierung des Stoffhaushalts der Waldstandorte an den Level II-Standorten Baden-Württembergs.* Abschlussbericht zum Werkvertrag, bearbeitet durch ÖKO-DATA im Auftrag der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg.
- Becker R., 2003:** *Critical Loads und dynamische Modellierung.* Bericht über Workshop Integrierende Auswertung der Daten des Forstlichen Umweltmonitorings (Level II). BMVEL Bonn: 70-72.
- Chodak M., Ludwig B., Beese F., 2002:** *An Equation to describe gradients of elements concentrations in soils under beech and spruce stands.* J. Plant Nutr. Soil Sci. 165: 602-608.
- Gundersen P., Emmett B. A., Kjonaas O. J., Koopmans C. J., Tietema A., 1998:** *Impact of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forests: a synthesis of NITREX data.* Forest Ecol. Manag. 101: 37-55.

- Jenkinson D. S., 1966:** *The priming action*. In: The use of isotopes in soil organic matter Studies. Rep. of Food and Agr. Orgn. and Intern. Atomic Agency. Braunschweig-Völkenrode 1963: 199-207.
- Kopron H., 2004:** *Dynamika składników odżywczych w glebach i organach asymilacyjnych sosny zwyczajnej (Pinus sylvestris) w uprawie regeneracyjnej w zasięgu długoletniej emisji azotowej*. Rozpr. doktorska. Lublin: 3-190
- Kowalkowski A., 1980:** *Wpływ emisji Zakładów Azotowych na rozmieszczenie łatwo rozpuszczalnych składników mineralnych profilu gleb leśnych bielicowych*. Roczn. Glebozn. XXXI, nr 3/4. Warszawa: 245-252.
- Kowalkowski A., 1983:** *Wpływ pozyskania biomasy w drzewostanach sosnowych na obieg składników mineralnych oraz właściwości gleb siedlisk borowych*. Prace IBL, Nr 598, Warszawa: 68-85.
- Kowalkowski A., 2002:** *Wskaźniki ekochemicznego stanu gleb leśnych zagrożonych przez zakwaszenie*, Regionalny Monitoring Środowiska Przyrodniczego, Nr. 3. KTN, Kielce: 31-43.
- Kowalkowski A., Józwiak M., Kozłowski R., 2002:** *Metoda badania wpływu wód opadowych na właściwości gleb leśnych*. Monitoring Środowiska Przyrodniczego, Nr. 3. KTN Kielce: 45-51.
- Kowalkowski A., Jedliczko S., 1996:** *Degradacja gleb wytworzonych z piasków pod wpływem emisji azotowej*. Technika i technologia w ochronie środowiska. I Forum Inżynierii Ekologicznej, Lublin-Nałęczów: 71-80.
- Kowalkowski A., Kopron H., Lewandowska J., Jedliczko S., Plecha R., 1999:** *Reakcje gleb i doświadczeń upraw leśnych na kompensacyjne nawożenie*. W: A. Kowalkowski (red.) *Funkcjonowanie gleb leśnych na terenach zagrożonych i trendy jego zmian*. Kom. Nauk Leśnych PAN, Warsztaty Naukowe, Puławy 16-17 września 1999: 65-114.
- Kowalkowski A., Kopron H., 2003:** *Monitoring środowiska leśnego pod wpływem emisji azotowej w otoczeniu Zakładów Azotowych „Puławy”*. Sprawozdanie z prac wykonanych w roku 2002 z dokumentacją wynikową i częściową syntezą. Puławy-Kielce: 1-65+33+63.
- Kowalkowski A., Kopron H., 2005:** *Monitoring Środowiska leśnego pod wpływem emisji przemysłowych w otoczeniu Zakładów Azotowych „Puławy”*. Sprawozdanie z prac wykonanych w roku 2004. Puławy-Kielce: 4-49.
- Kowalkowski A., Kopron H., 2006:** *Dynamika wartości pH w przedziałach buforowości gleb w regeneracyjnych uprawach sosnowych w zasięgu emisji azotowej*. Monitoring Środowiska Przyrodniczego, Nr. 7. KTN Kielce:
- Kowalkowski A., Szczepny P., 1974:** *Preliminary results of investigations on range and magnitude of immission of nitrogen compounds in soils in the vicinity of Puławy*. Roczn. Glebozn. XXV: 179-183.
- Kölling C., 1999:** *Ordination von Waldökosystemen nach Stoffkonzentrationen der Lösungsphase und bodenchemischen Tiefengradienten*. J. Plant Nutr. Soil Sci. 162: 89-95.
- Kozłowski R., 2002:** *Zróżnicowanie wielkości i jakości wód spływających po pniach drzew w wybranych ekosystemach leśnych w Górach Świętokrzyskich*. Monitoring Środowiska Przyrodniczego, Nr. 3. KTN Kielce: 95-102.
- Kuzyakow Y., 2002:** *Rewiew: Factors effecting rhizosphere priming effects*. J. Plant Nutr. Soil Sci., Weinheim: 382-396.
- Nihlgard B., 1985:** *The ammonium hypothesis and additional explanation to the forest dieback in Europe*. Ambio 14: 2-8.
- Rode M. W., 1999:** *The interaction between organic layer and forest growth and forest development on former heathland*. For. Ecol. Manage. 114: 117-12'
- Schinner F., Sonnleitner R., 1996:** *Bodenökologie: Mikrobiologie und Bodensystematik*. Hamburg und Berlin.
- Ulrich B., Mayer R., Khanna P. K., 1979:** *Deposition von Luftverunreinigungen und ihre Auswirkungen in Waldökosystemen im Solling*. Schr. Forstl. Fak., Uni. Göttingen Bd. 58.
- Wessel W. W., Tietema A., 1995:** *Metal distribution across different pools in the organic layer of a forest under acid deposition and its consequences for the metal dynamics*. Plant Soil 171: 341-350.
- Wolff B., Riek W., 1999:** *Deutscher Waldbodenbericht 1996*. Bd.1, BMELF, Bonn: 1-1 142.

## DYNAMICS OF ECOGEOCHEMICAL SOIL PROPRIETIES IN REGENERATING PINES CULTURE

### Summary

The pine regeneration tillage was put in 1996, on after-forestal and industry wear soils, in 1,4 km NE distance from the large emitter. During institution of tillage, at ploughing up furrows, the structural building the ground surface and upper part soil profile was altered to depth of 40cm. The compensatory mineral fertilizations of Ca, Mg, K and P were executed also. The soil samples were taken with five depths to 45cm, in 28 deadlines in the early spring, summer and autumn times, since autumn 1995 till autumn 2004. On the basis of the gathered data, introduced in tab. 1-3 as well as on ryc. 1-6, introduced the profile of research object and laboratory methods, the ecochemical change and state of the rhizosphere layer in soil before the establishment of pine tillage, the ecochemical change in this layer after the establishment of pine tillage with regard to the times of year, the gradients of the easily variables components of soil in rhizosphere. Three developing phases of quantitatively - qualitative dynamics of the easily variables elements in lengthening periods of time were affirmed.