

UWALNIANIE MINERALNYCH FORM FOSFORU W GLEBIE I ZAWARTOŚĆ TEGO SKŁADNIKA W RUNI ŁĄKOWEJ W WARUNKACH PRZEWAGI OPADOWEJ GOSPODARKI WODĄ

Barbara SAPEK, Andrzej SAPEK

Instytut Melioracji i Użytków Zielonych w Falentach, Zakład Chemii Gleby i Wody

Słowa kluczowe: gleba łąkowa, mineralizacja, nawożenie fosforem, roślinność, uwalnianie, związki fosforu

Streszczenie

Badano uwalnianie fosforu w glebie trwałej łąki kośnej w warunkach stosowania nawożenia fosforem, a także zaniechania na pewien czas tego zabiegu. W badaniach mineralizacji organicznych związków fosforu wykorzystano metodę inkubacji gleby *in situ*. Stwierdzono swoiste, zależne od odczynu i uwilgotnienia gleby oraz zawartości w niej węgla i postaci stosowanego nawozu azotowego, uwalnianie fosforu w wyniku mineralizacji połączeń organicznych lub desorpcji form nieorganicznych w glebie. Odczyn gleby bliski obojętnemu sprzyjał uwalnianiu związków fosforu. W przypadku okresowego braku nawożenia fosforem gleby należy się liczyć ze zubożeniem runi łąkowej w ten składnik, lecz pasza łąkowa produkowana na glebie zasobnej w fosfor oraz w próchnicę, o korzystnych warunkach wilgotnościowych, będzie właściwie zaopatrzona w ten składnik przez co najmniej trzy lata.

WSTĘP

W procesie mineralizacji materii organicznej gleby związki fosforu z tą materią, tak jak związki azotu, przechodzą z formy organicznej w mineralną, dostępną

Adres do korespondencji: prof. dr hab. B. Sapek, Instytut Melioracji i Użytków Zielonych, Zakład Chemii Gleby i Wody, al. Hrabstwa 3, Falenty, 05-090 Raszyn; tel. +48 (22) 720-05-31, w. 220, e-mail: b.sapek@imuz.edu.pl

dla roślin. Fosfor nagromadzony w glebie w wyniku systematycznego nawożenia stanowi znaczny zapas, z którego roślinność łąkowa mogłaby korzystać przez pewien czas, mimo zaniechania nawożenia gleby tym składnikiem.

Fosfor uwolniony w wyniku mineralizacji może częściowo przemieszczać się w głąb profilu gleby, skąd może być wymywany do wody gruntowej. Konieczność ograniczenia zużycia nieodnawialnych zasobów naturalnych (energetycznych i kopalin stosowanych w nawożeniu) jest jednym z podstawowych warunków realizacji zrównoważonego rozwoju obszarów wiejskich. W tym świetle badanie zachowania i losów fosforu, w tym uwolnionego w wyniku mineralizacji jego związków z materią organiczną gleby użytków zielonych, nabrały szczególnego znaczenia.

Celem pracy było badanie uwalniania fosforu w wyniku mineralizacji jego organicznych związków w glebie trwałej łąki kośnej w warunkach stosowania nawożenia fosforem, a także zaniechania na pewien czas tego zabiegu. Uzyskane wyniki odniesiono do zawartości tego składnika w roślinności łąkowej.

OBIEKTY DOŚWIADCZALNE I METODY BADAŃ

Badania wydajności mineralizacji związków fosforu w glebie wykonano na przykładzie długoletnich doświadczeń łąkowych zlokalizowanych w miejscowościach Janki (J) i Laszczki (L). Do badań wybrano obiekty nawozowe – niewapnowane Ca_0 i wapnowane jednorazowo w 1981 r. podwojoną dawką wapna (Ca_2), nawożone $240 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$ (N-240) w postaci saletry amonowej (AN), a począwszy od 1992 r. równoległe (na połowie poletka) w postaci saletry wapniowej (CN) [SAPEK, 2006]. Prezentowane w pracy wyniki badań uwalniania fosforu z gleby w warunkach nawożenia tym składnikiem w ilości $35 \text{ kg P}\cdot\text{ha}^{-1}$ w jednej rocznej dawce pod pierwszy odrost, obejmują tylko dwa lata, 1998–1999, ponieważ oznaczanie ilości fosforu uwolnionego w procesie mineralizacji rozpoczęto w 1998 r. Wyniki tych badań w warunkach okresowego zaniechania nawożenia gleby tym składnikiem obejmują lata 2000–2002. Badania dotyczące zawartości fosforu w trzech odrostach roślinności łąkowej nawożonej fosforem, również azotem w ilości 120 i $240 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ obejmują lata 1997–1999, a nienawożonej – lata 2000–2002. Szczegółowy opis doświadczeń zawierają wcześniejsze prace [SAPEK, 1993; SAPEK, BARSZCZEWSKI, 2000]

Do badań wykorzystano metodę inkubacji *in situ*, stosowaną dotychczas w badaniach mineralizacji organicznych związków azotu, umożliwiającą badanie procesu mineralizacji w warunkach zbliżonych do naturalnych [ADAMS, POLGLASE, ATTIVIL, 1989; DEBOSZ, VINTHER, 1989]. Opis metody inkubacji *in situ*, polegającej na pobieraniu próbek gleby z plastikowych rurek instalowanych w wierzchniej (0-10 cm) warstwie, odizolowanych od wpływu pobierania azotu przez rośliny oraz wymywania przez opady, i jej zastosowania w niniejszych badaniach zawierają

wcześniejsze publikacje [SAPEK, 1999, SAPEK, SAPEK; BARSZCZEWSKI, 2002]. Jednocześnie pobierano próbki gleby z miejsc obok zainstalowanych rurek, bezpośrednio spod roślinności. Obydwa rodzaje próbek pobierano:

- wczesną wiosną przed ruszeniem wegetacji i wysiewem nawozu – termin I (próbki inkubowane pozostawiano w glebie w okresie od ostatniego pokosu do ruszenia wegetacji),
- po kolejnych odrostach runi – terminy II–IV (próbki inkubowane pozostawały w glebie w czasie kolejnych odrostów runi).

Do badań zawartości fosforu w roślinności łąkowej wykorzystano próbki z trzech odrostów runi łąkowej w ramach corocznego schematu pobierania próbek z obiektów nawozowych dwóch realizowanych doświadczeń łąkowych.

Zawartość mineralnej formy fosforu w próbkach gleby po inkubacji *in situ* (R) oraz w próbkach pobranych spod roślinności (T) oznaczano, podobnie jak w przypadku mineralnych form azotu, w wyciągu 1% K_2SO_4 . Zawartość fosforu w próbkach roślinności oznaczono po ich mineralizacji w mieszaninie stężonych kwasów – azotowego, nadchlorowego i siarkowego. Oznaczenie fosforu w próbkach gleby i roślinności wykonano metodą spektrofotometryczną za pomocą automatycznego analizatora przepływowego SKALAR. Pojedynczy wynik oznaczeń fosforu w badaniach jest średnią z oznaczeń w 16 próbkach gleby (4 próbki na każdym obiekcie nawozowym w 4 powtórzeniach). Oznaczenia wykonywano w świeżej masie gleby. Wyniki podano w przeliczeniu na $kg\ P\cdot ha^{-1}$.

Do oceny istotności wpływu zaniechania nawożenia gleby fosforem na jego zawartość w runi łąkowej zastosowano wielowymiarową analizę zmienności.

CHARAKTERYSTYKA OBIEKTÓW DOŚWIADCZALNYCH

Podstawowe cechy gleb z doświadczeń oraz warunki meteorologiczne (opady i temperaturę otoczenia), panujące w rejonie doświadczeń w latach badań podano na wstępie monografii, w opisie pola badawczego [SAPEK, 2006].

Gleby z doświadczeń różniły się pojemnością wymienną kompleksu sorpcyjnego w stosunku do kationów PWK_c (na doświadczeniu J – 7,8, na doświadczeniu L – $23,8\ cmol\ (+)\cdot kg^{-1}$), co jest spowodowane różnicami składu granulometrycznego i zawartości węgla organicznego. Zawartość fosforu ogólnego w glebie obu doświadczeń była podobna (0,07%), a zawartość azotu ogólnego w glebie z doświadczenia L (0,31%) była dwukrotnie większa niż w glebie z doświadczenia J [SAPEK, 1993].

Począwszy od 1999 r. obserwowano, zwłaszcza w okresie wegetacji, niekorzystne zmniejszenie opadu, któremu towarzyszył wzrost średniej temperatury powietrza. Skrajnie małe opady wystąpiły w 2000 (288 mm) i w 2002 r. (293 mm) [KILISZCZYK, BARSZCZEWSKI, 2006; SAPEK, 2006]. Gleba doświadczenia L była znacznie lepiej uwilgotniona w porównaniu z glebą doświadczenia J (tab. 1).

Tabela 1. Średnie uwilgotnienie 0–50 cm warstwy gleby w okresie wegetacyjnym (IV–IX) na doświadczeniach w latach 1995–2003

Table 1. Average humidity of 0–50 cm soil layer during vegetation season (IV–IX) in experiments in 1995–2003

Doświadczenie Experiment	Uwilgotnienie gleby; % obj. Soil humidity, % vol.								
	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Janki	21,4	23,6	26,3	26,8	21,4	20,7	24,0	20,3	19,4
Laszczki	28,3	31,2	34,6	32,4	27,0	24,8	25,5	25,2	23,8

Odczyn gleby wapnowanej na obiektach nawozowych obu doświadczeń, oznaczony w 1999 r., świadczy o długoletnim działaniu zabiegu zobojętniającego nadmierną kwasowość gleby trwałego użytku zielonego, nawożonego saletrą amonową. Po prawie 20 latach od wapnowania węglanem wapnia pH tej gleby wynosiło 5,1 w przypadku większej dawki AN i 5,7 w przypadku dawki mniejszej. Tymczasem gleby z obiektów niewapnowanych, zwłaszcza uboga w próchnicę gleba z doświadczenia J, nawożone dawką azotu 240 kg N·ha⁻¹ w postaci saletry amonowej, uległy silnemu zakwaszeniu. Stosowanie saletry wapniowej skutecznie przeciwdziałało procesowi zakwaszenia gleby (tab. 2).

Tabela 2. Średnie wartości pH_{KCl} warstwy gleby 0–10 cm z obiektów nawozowych doświadczeń w Jankach, Laszczkach w 1999 r.; nawożenie 240 kg N·ha⁻¹

Table 2. Mean pH_{KCl} values in 0–10 soil layer in fertilisation treatments of Janki and Laszczki experiments in 1999; fertilization 240 kg N·ha⁻¹

Doświadczenie Experiment	Obiekty niewapnowane Not limed treatments		Obiekty wapnowane Limed treatments	
	AN	CN	AN	CN
	Janki	3,3	5,0	5,1
Laszczki	4,0	5,2	6,2	7,3

Objaśnienia: AN – obiekty nawożone saletrą amonową, CN – obiekty nawożone saletrą wapniową.

Explanations: AN – treatments fertilised with ammonium nitrate, CN – treatments fertilised with calcium nitrate.

OMÓWIENIE WYNIKÓW

MINERALIZACJA ORGANICZNYCH ZWIĄZKÓW FOSFORU W GLEBIE

W glebie nawożonej fosforem, w zależności od obiektu nawozowego i terminu pobrania próbki, średnie ilości fosforu uwolnionego w doświadczeniu J w procesie mineralizacji w warunkach inkubacji *in situ* (R) wynosiły 0,91–2,5 kg P·ha⁻¹, a po okresowym zaniechaniu tego zabiegu – 0,41–2,1 kg P·ha⁻¹ (rys. 1a). W glebie do-

świadczenia L, bogatszej w próchnicę i o lepszych warunkach wilgotnościowych, uwalniało się mniej fosforu – odpowiednio 0,50–1,9 i 0,48–2,1 kg P·ha⁻¹ (rys. 1c). Na obydwóch doświadczeniach ilości fosforu w glebie pod roślinnością były mniejsze niż w próbkach gleby inkubowanej (rys. 1b, d).

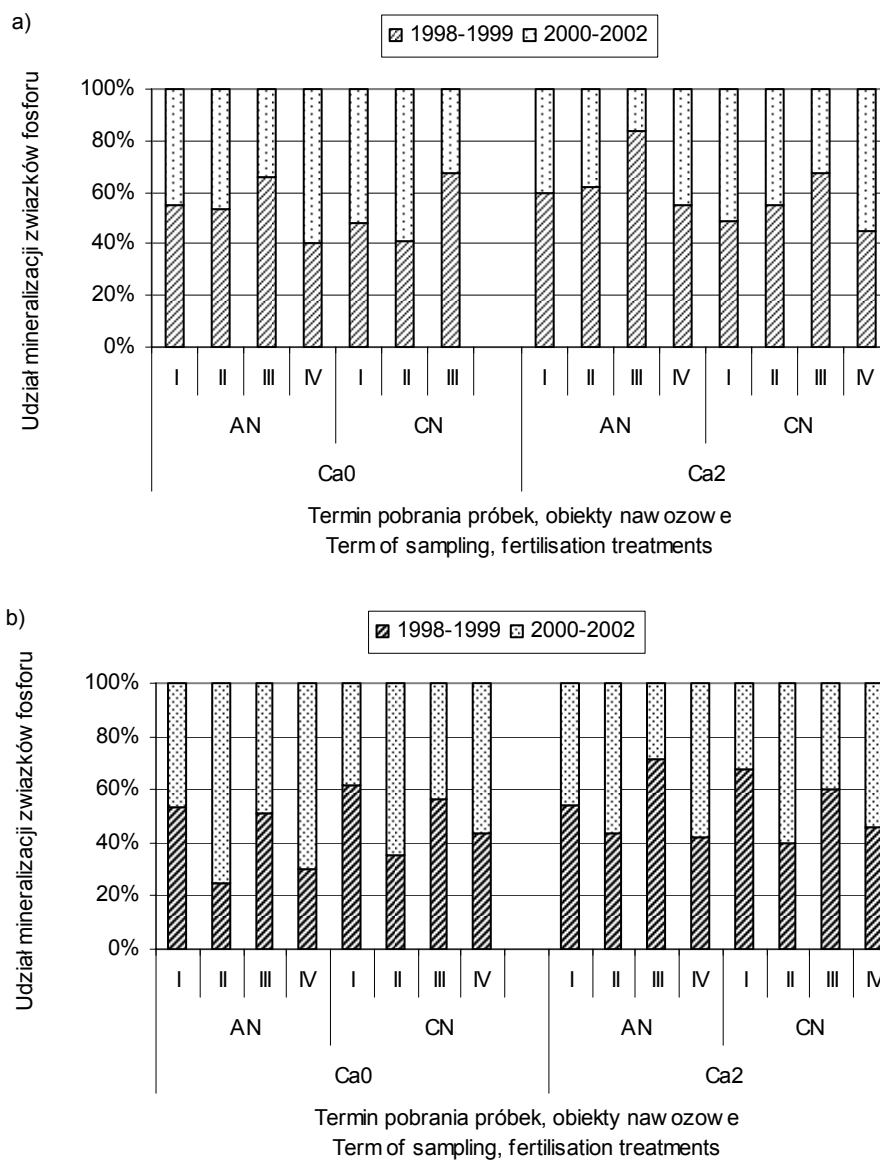
W warunkach nawożenia gleby fosforem, w procencie mineralizacji *in situ*, najwięcej tego składnika uwalniało się zazwyczaj w okresie pierwszego lub drugiego odrostu runi (termin II i III), jednak zmiany intensywności tego procesu nie były tak wyraźne jak po zaniechaniu tego zabiegu. W okresie braku podaży fosforu z nawozu maksymalne uwalnianie się jego związków stwierdzono w okresie pierwszego odrostu runi (termin II) i to na obydwóch doświadczeniach (rys. 1a, c). W tym czasie zawartość fosforu w glebie pod roślinnością również była największa, lecz proporcjonalnie mniejsza niż w próbkach inkubowanych, co wskazuje na intensywne pobieranie tego składnika przez run łąkową pierwszego pokosu (rys. 1b, d).

Porównano, wyrażoną w procentach, wydajność mineralizacji związków fosforu w glebach dwóch doświadczeń przed i po zaniechaniu nawożenia tym składnikiem. W warunkach braku nawożenia fosforem była ona znacznie większa w glebie z doświadczenia L (rys. 2b) niż w ubogiej w próchnicę glebie doświadczenia J (rys. 2a).

Obserwowano pewien swoisty, następczy wpływ wapnowania oraz postaci saletry (AN i CN), zależny od nawożenia fosforem lub jego braku, na wydajność mineralizacji związków fosforu w glebie po inkubacji *in situ* (R). W warunkach nawożenia fosforem doświadczenia J ilości tego składnika uwolnione w glebie wyniosły od 3,6 kg P·ha⁻¹ na obiekcie Ca₀CN w 1999 r. do 10,9 kg P·ha⁻¹ na obiekcie Ca₂CN w 1998 r. (tab. 3). W pewnym stopniu podobna zależność pojawiła się w glebie pod roślinnością (T). W dwuletnim okresie badań najwięcej fosforu (średnio około 6–7 kg P·ha⁻¹·rok⁻¹) uwolniło się w glebie niewapnowanej, nawożonej saletrą amonową (Ca₀AN) oraz w glebie wapnowanej, nawożonej saletrą wapniową (Ca₂CN), a więc w skrajnych warunkach odczynu gleby (rys. 3a). Odczyn gleby bliski obojętnemu (Ca₂CN) sprzyjał mineralizacji organicznych związków fosforu na obydwóch doświadczeniach (rys. 3a, b, tab. 2).

W warunkach panujących w glebie z obiektu Ca₀CN na obu doświadczeniach (pH 5,0–5,2) nawożenie fosforem lub jego zaniechanie nie wpływało znacząco na ilość tego składnika uwalnianego z gleby (ok. 4 kg·ha⁻¹·rok⁻¹) (tab. 2, rys 3a, b). Po zaniechaniu nawożenia fosforem doświadczenia J, najwięcej tego składnika uwolniło się, podobnie jak w warunkach nawożenia fosforem, w glebie na obiekcie Ca₂CN (rys. 3a). Na doświadczeniu L brak nawożenia fosforem wywarł znacznie mniejszy wpływ na wydajność mineralizacji organicznych związków fosforu. W tych warunkach na obydwóch doświadczeniach najwięcej fosforu uwolniło się w glebach o skrajnych wartościach pH (tab. 2, 3, rys. 3).

Wykazany, w warunkach gleby inkubowanej *in situ*, swoisty wpływ wapnowania oraz postaci stosowanej saletry na uwalnianie fosforu stwierdzono również w glebie pod roślinnością (rys. 3).



Rys. 2. Porównanie średniego procentowego udziału mineralizacji związków fosforu w warunkach inkubacji gleby *in situ*, w czasie nawożenia fosforem (1998–1999) i w czasie okresowego zaniechania tego zabiegu (2000–2002) na doświadczeniu w Jankach (a) i Laszczkach (b); pozostałe opisy jak na rys. 1

Fig. 2. Comparison of the mean percent share of phosphorus mineralization in soil incubated *in situ* fertilized with phosphorus (1998–1999) and after discontinuation of this treatment (2000–2002) in Janki (a) and Laszczki (b); experiments; other explanations as in fig. 1

Tabela 3. Sumy roczne fosforu uwolnionego w procesie mineralizacji w 0–10 cm warstwie gleby nawożonej fosforem w warunkach inkubacji *in situ* (R) oraz spod roślinności (T) na doświadczeniu w Jankach i Laszczkach, w latach 1998–1999 (A) i po zaniechaniu nawożenia fosforem w latach 2000–2002 (B)

Table 3. Annual sums of phosphorus released due to mineralization in 0–10 cm layer of soil fertilized with phosphorus during *in situ* incubation (R) and from under vegetation (T) in Janki and Laszczki experiment in the years 1998–1999 (A) and after discontinuation of phosphorus fertilization in 2000–2002 (B)

Lata Years		Rodzaj póbki Kind of sample	Ca ₀				Ca ₂				
A	B		AN		CN		AN		CN		
		k·ha ⁻¹									
		Janki									
–	2000	R	–	5,22	–	4,57	–	3,19	–	5,28	
		T	–	4,96	–	3,29	–	3,50	–	3,59	
1998	2001	R	7,66	3,08	6,07	2,80	5,18	1,51	10,89	3,43	
		T	5,40	2,97	4,78	2,65	5,56	1,36	8,57	3,07	
1999	2002	R	5,42	4,16	3,57	3,47	5,59	2,56	5,46	2,59	
		T	4,75	2,31	2,53	1,29	3,89	1,09	4,24	2,40	
Laszczki											
–	2000	R	–	4,20	–	2,61	–	3,56	–	3,72	
		T	–	2,64	–	1,77	–	2,49	–	2,88	
1998	2001	R	3,30	3,77	4,68	3,24	5,33	2,75	7,05	4,21	
		T	2,70	3,30	4,73	3,12	4,55	2,59	5,98	4,26	
1999	2002	R	4,98	4,16	3,98	5,02	3,28	2,61	5,47	3,53	
		T	3,60	4,42	3,50	2,79	2,81	2,27	4,49	2,45	

Liczba próbek $n = 65$.

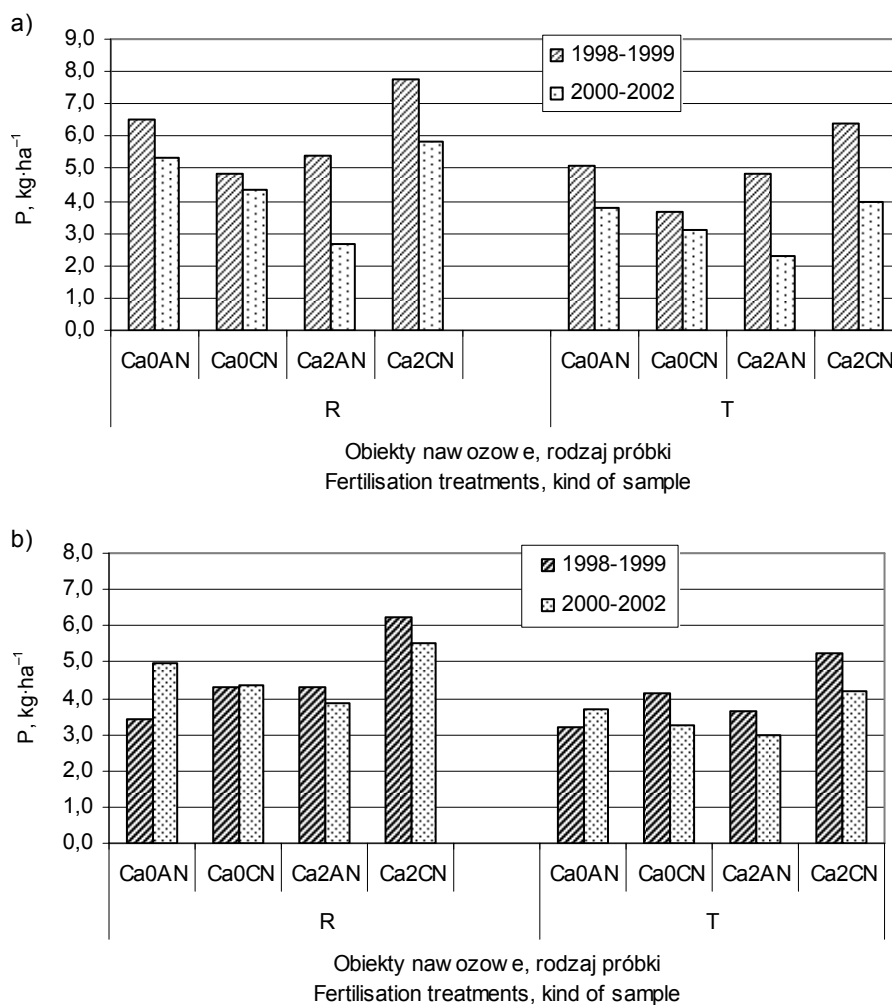
Objaśnienie: Ca₀ – obiekty niewapnowane, Ca₂ – obiekty wapnowane dawką wg 2Ah; pozostałe objaśnienia jak pod tabelą 2.

Number of samples $n = 65$.

Explanation: Ca₀ – not limed treatments, Ca₂ – treatments limed with the dose according to 2Ah; other explanations as in Tab. 2.

ZAWARTOŚĆ FOSFORU W ROŚLINNOŚCI ŁĄKOWEJ

Rozpatrzono wyniki oznaczeń zawartości fosforu w roślinności łąkowej w warunkach nawożenia fosforem i okresowego zaniechania tego nawożenia. Na doświadczeniu J w okresie nawożenia fosforem, najzasobniejsza w ten składnik była roślinność I odrostu z obiektów uprzednio wapnowanych i nawożonych saletrą amonową (0,35–0,36% P) (tab. 4). Nawożenie saletrą wapniową powodowało



Rys. 3. Średnie sumaryczne ilości fosforu uwolnione w ciągu roku w procesie mineralizacji gleby w warunkach *in situ* (R) i w glebie pod roślinnością (T) w czasie nawożenia gleby fosforem (1998–1999) i w okresie zaniechania tego zabiegu (2000–2002) na doświadczeniu w Jankach (a) i Laszczkach (b); pozostałe opisy jak na rys. 1

Fig. 3. Mean total content of phosphorus released annually due to soil mineralization during *in situ* (R) soil incubation and in soil from under vegetation (T) fertilised with phosphorus (1998–1999) and after discontinuation of this treatment (2000–2002) in Janki (a) and Laszczki (b) experiments, other descriptions as in fig. 1

zmniejszanie zawartości fosforu w runi łąkowej. Ruń I odrostu z doświadczenia L była zasobniejsza w fosfor niż ruń z doświadczenia J. Na obydwóch doświadczeniach najzasobniejsza w ten składnik (0,36–0,40% P) była ruń rosnąca na glebie najmniej zakwaszonej, lecz nie wykazano istotności tego wpływu (tab. 2 i 4). Tyl-

Tabela 4. Średnie zawartości fosforu w roślinności łąkowej z trzech odrostów runi nawożonej fosforem z doświadczeń w Jankach i Laszczkach w latach 1997–1999**Table 4.** Mean content of phosphorus in meadow vegetation from three regrowths of sward fertilized with phosphorus in Janki and Laszczki experiments in 1997–1999

Rodzaj saletry Kind of saltpetre	Odrost Regrowth	Zawartość fosforu (%) w runi z obiektów Phosphorus content (%) in sward from objects					NIR _{Ca} Tukeya	NIR _N Tukeya
		Ca ₀	Ca ₁	Ca ₂	N-120	N-240	Tukey's NIR _{Ca}	Tukey's NIR _N
Janki								
AN	I	0,352	0,362	0,353	0,349	0,362	n.i.	n.i.
	II	0,267	0,292	0,293	0,294	0,273	n.i.	n.i.
	III	0,290	0,307	0,315	0,318	0,290	n.i.	0,019**
CN	I	0,342	0,343	0,345	0,346	0,341	n.i.	n.i.
	II	0,283	0,283	0,295	0,294	0,280	n.i.	n.i.
	III	0,288	0,290	0,295	0,319	0,263	n.i.	0,024**
Laszczki								
AN	I	0,393	0,405	0,405	0,399	0,403	n.i.	n.i.
	II	0,303	0,342	0,347	0,348	0,313	n.i.	0,031*
	III	0,310	0,348	0,332	0,360	0,300	n.i.	0,046*
CN	I	0,390	0,393	0,385	0,388	0,391	n.i.	n.i.
	II	0,305	0,323	0,318	0,331	0,300	n.i.	n.i.
	III	0,327	0,345	0,317	0,347	0,312	n.i.	n.i.

Objaśnienia: N-120 – dawka azotu 120 kg N·ha⁻¹, N-240 – dawka azotu 240 kg N·ha⁻¹, n.i. – różnice nieistotne, * – różnice istotne; pozostałe objaśnienia jak pod tabelą 2 i 3.

Explanations: AN – treatments fertilised with ammonium nitrate, CN – treatments fertilised with calcium nitrate, N-120 – ammonium dose 120 kg N·ha⁻¹, N-240 – ammonium dose 240 kg N·ha⁻¹, n.i. – insignificant differences, * – differences significant; others explanations as in Tab. 2 and 3.

ko częściowo udowodniono wpływ większej dawki azotu zmniejszający zawartość fosforu w runi łąkowej (tab. 4).

Zaniechanie nawożenia fosforem gleby doświadczenia J zmniejszyło zawartość tego składnika w runi trzech odrostów w zakresie od 0,21% (CN, N-240) do 0,30% P w s.m (AN, N-240) (tab. 5). Mniejsza kwasowość gleby, wynikająca z następczego wpływu wapnowania, sprzyjała większej zawartości P w runi (tab. 2 i 5). W warunkach braku nawożenia fosforem roślinność z doświadczenia L nadal była bardziej zasobna w fosfor w porównaniu z roślinnością z doświadczenia J. Najmniejsze zawartości fosforu (0,25% P w s.m.) w runi drugiego odrostu z doświadczenia J i trzeciego z doświadczenia L (Ca₀AN) stwierdzono na glebie najbardziej zakwaszonej. Nawożenie saletrą wapniową, mimo różnic w odczynie gleby, częściowo stabilizowało zawartość fosforu w runi (tab. 2 i 5, rys. 4). Podobnie jak w warunkach nawożenia gleby fosforem, udowodniono jedynie częściowo ujemny wpływ większej dawki azotu na zawartość P w runi. (tab. 5).

Tabela 5. Średnie zawartości fosforu w roślinności łąkowej trzech odrostów runi po okresowym zaniechaniu nawożenia fosforem z doświadczeń w Jankach i Laszczkach w latach 2000–2002

Table 5. Mean content of phosphorus in meadow vegetation from three regrowth of sward after discontinuation of phosphorus fertilization in Janki and Laszczki experiments in 2000–2002

Rodzaj saletry Kind of saltpetre	Odrost Regrowth	Zawartość fosforu (%) w runi z obiektów Phosphorus content (%) in sward from objects					NIR _{Ca} Tukeya	NIR _N Tukeya
		Ca ₀	Ca ₁	Ca ₂	N-120	N-240	Tukey's NIR _{Ca}	Tukey's NIR _N
Janki								
AN	I	0,263	0,272	0,275	0,272	0,268	n.i.	n.i.
	II	0,253	0,255	0,247	0,259	0,244	n.i.	n.i.
	III	0,293	0,290	0,290	0,301	0,281	n.i.	n.i.
CN	I	0,253	0,255	0,267	0,272	0,244	n.i.	n.i.
	II	0,227	0,223	0,227	0,241	0,210	n.i.	0,029*
	III	0,258	0,257	0,267	0,273	0,248	n.i.	n.i.
Laszczki								
AN	I	0,270	0,293	0,297	0,304	0,269	n.i.	n.i.
	II	0,303	0,342	0,347	0,348	0,313	n.i.	0,031*
	III	0,255	0,297	0,282	0,302	0,253	n.i.	0,037
CN	I	0,292	0,290	0,313	0,309	0,288	n.i.	n.i.
	II	0,257	0,270	0,267	0,287	0,242	n.i.	0,026*
	III	0,302	0,302	0,300	0,316	0,287	n.i.	n.i.

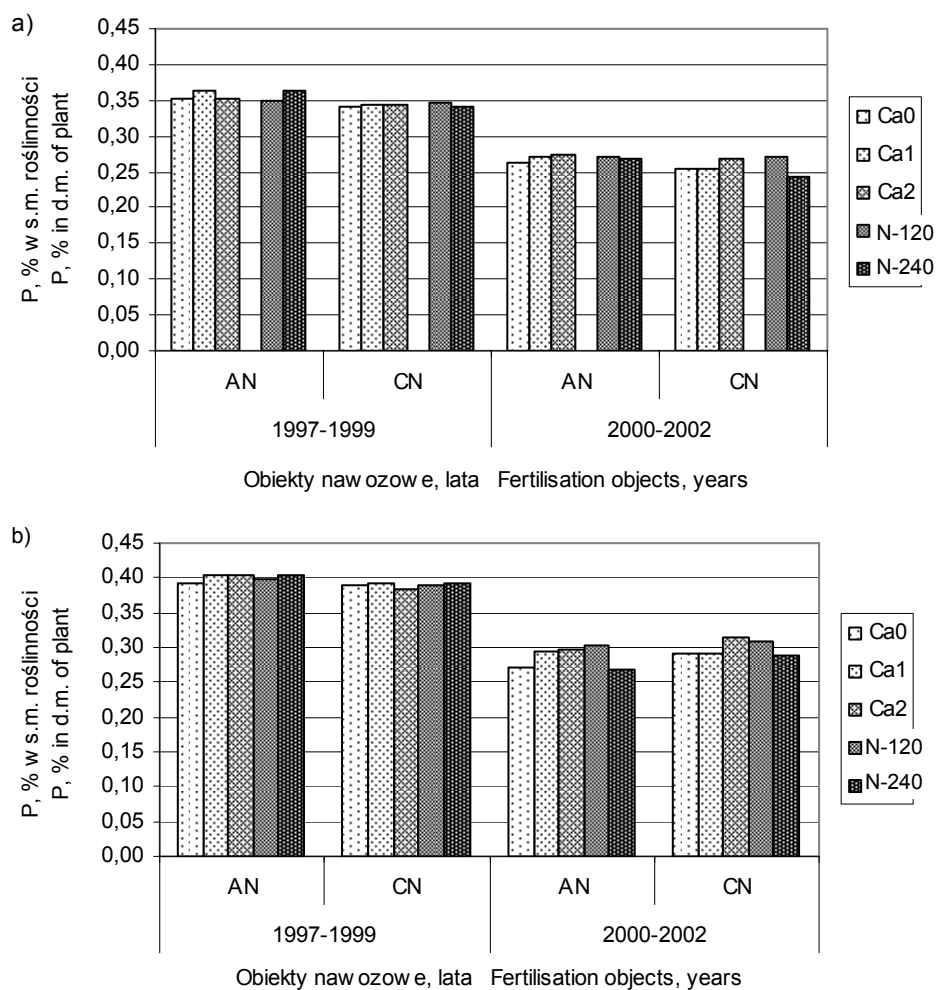
Objaśnienia jak pod tabelą 4.

Explanations as in Tab. 4.

Porównując zawartość fosforu w roślinności w latach objętych nawożeniem fosforem i okresowo nienawożonej tym składnikiem stwierdzono, w tym ostatnim przypadku, ubożenie runi w fosfor we wszystkich kombinacjach nawozowych doświadczenia J (od około 0,35 do około 0,27% P) oraz doświadczenia L (od około 0,40 do około 0,30 P%) (rys. 4a, b). Na doświadczeniu L nastąpił wpływ wapnowania w warunkach braku nawożenia fosforem silnie zaznaczył się w runi z obiektów nawożonych AN. W tych warunkach saletra wapniowa również oddziaływała stabilizująco na zasobność runi w fosfor (rys. 4 a, b, tab. 6). Wykazano istotny, ujemny wpływ zaniechania nawożenia gleby fosforem na zawartość tego składnika w runi łąkowej oraz zmniejszające tę zawartość działanie saletry wapniowej (tab. 6).

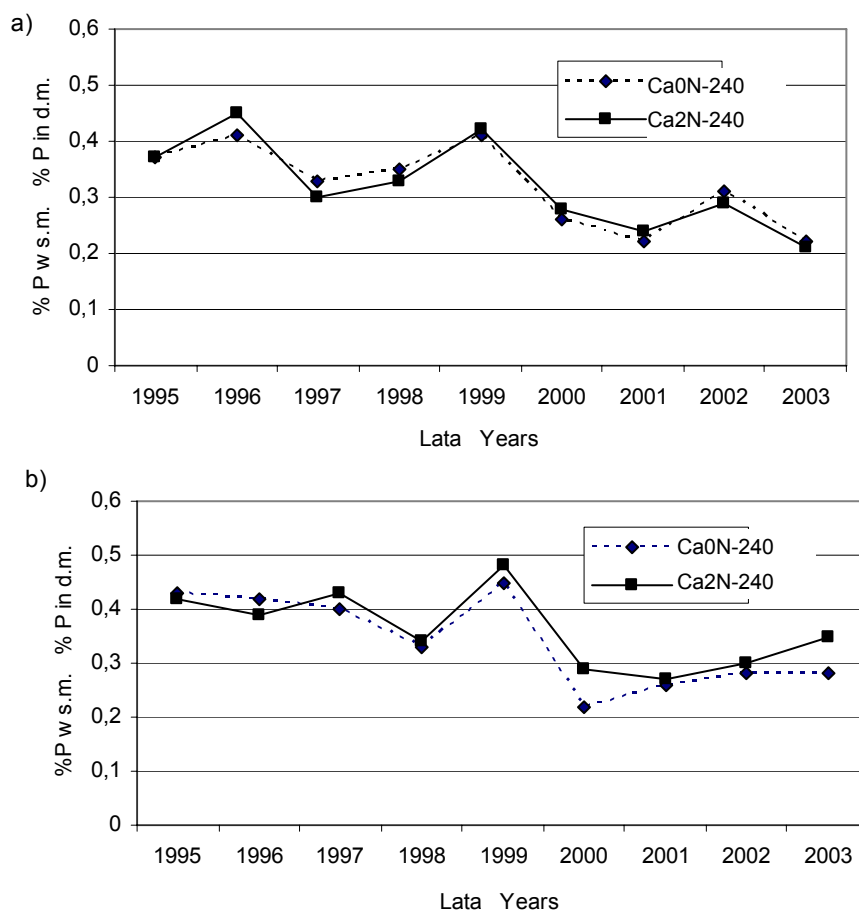
Z przebiegu zmian zawartości P w roślinności I odrostu na glebie nawożonej saletrą amonową niewapnowanej (Ca₀N-240AN) i wapnowanej (Ca₂N-240AN) w latach 1995–2003 (rys. 5) wynika, jak już wykazano, że okresowe zaniechanie nawożenia fosforem zmniejsza zawartość fosforu w runi łąkowej. Jednak na glebie zasobnej w próchnicę i o dobrym uwilgotnieniu, jak na doświadczeniu L, zawar-

tość P w runi, po początkowym spadku, wykazała tendencję wzrostową, mimo braku nawożenia tym składnikiem (rys. 5 b).



Rys. 4. Średnie zawartości fosforu (% P) w s.m. roślinności łąkowej I odrostu w czasie nawożenia gleby fosforem (1997–1999) i w okresie zaniechania tego zabiegu (2000–2002) na doświadczeniu w Jankach (a) i Laszczkach (b); pozostałe opisy jak na rysunku 1.

Fig. 4. Mean content of phosphorus (% P) in dry matter of meadow vegetation of the first regrowth during fertilization of soil with phosphorus (years 1997–1999) and after discontinuation of this treatment (years 2000–2002) in Janki (a) and Laszczki (b) experiments; other descriptions as in Fig. 1



Rys. 5. Zmiany zawartości fosforu w suchej masie roślinności łąkowej I odrostu z obiektów niewapnowanych (C_0N-240) i wapnowanych (C_2N-240), nawożonych saletra amonową na doświadczeniu w Jankach (a) i Laszczkach (b) w latach 1995–2003; począwszy od 2000 r. zaniechano nawożenia gleby fosforem; pozostałe opisy jak na rysunku 1.

Fig. 5. Changes of phosphorus content in dry matter of meadow vegetation of the first regrowth from treatments fertilized with ammonium nitrogen, not limed (C_0N-240) and limed (C_2N-240) in Janki (a) and Laszczki (b) experiments in the years 1995–2003; since 2000 soil was not fertilised with phosphorus; other descriptions as in fig. 1

DYSKUSJA

W przedstawionych w pracy badaniach uwalniania fosforu związanego z materią organiczną gleby wykorzystano, jak podano we wstępie, metodę stosowaną do oznaczania wydajności mineralizacji organicznych związków azotu. Założenie, że w tych warunkach uwolnienie fosforu z fazy stałej gleby przebiega tylko w wyniku

procesu mineralizacji jest pewnym uproszczeniem, jednakże zastosowana metoda umożliwia, podobnie jak w przypadku azotu, bliższe poznanie procesu uwalniania fosforu w warunkach naturalnych. Jak podają CHARDON i SCHOUMANS [2002], fosfor obecny w fazie stałej gleby znajduje się w formie organicznej:

- w żywych organizmach glebowych,
- świeżym materiale organicznym,
- w stabilnej materii organicznej (humusie),
- w formie nieorganicznej – wytrąceniach, adsorbowany oraz absorbowany przez nieorganiczne koloidy glebowe (części ilaste, wodorotlenki żelaza i glinu).

W wyniku procesów glebowych zależnych, w głównej mierze, od: pH, kationowej siły jonowej, zawartości kwasów organicznych, potencjału redox i temperatury fosfor jest uwalniany do fazy ciekłej gleby – roztworu glebowego, w którym występuje głównie w formie ortofosforanów i koloidowej frakcji organicznej lub związanej z rozpuszczalną formą węgla organicznego (RWO).

W świetle powyższych rozważań, podane w pracy ilości fosforu oznaczone w próbkach gleby przyjęte, w przybliżeniu, za uwolnione w procesie mineralizacji obejmują częściowo również nieorganiczne, mobilne formy fosforu, które w warunkach inkubacji *in situ* uległy rozpuszczeniu lub desorpcji. Za przewagą mineralizacji organicznych związków fosforu w badanej 0–10 cm warstwie gleby może przemawiać swoistość gleby łąkowej, ze swej natury bogatej w materię organiczną oraz żywe organizmy glebowe. Jak zaznacza HAYGARTH [2000], intensywniejsza mineralizacja organicznych związków fosforu w kilkucentymetrowej, wierzchniej warstwie gleby, wynikająca ze znacznie większej niż w głębszych warstwach jej aktywności mikrobiologicznej, maleje wraz z głębokością profilu gleby, natomiast udział formy organicznej w odniesieniu do nieorganicznej się zwiększa. Wykazana w pracy BURZYŃSKIEJ [2004] znaczna zawartość rozpuszczalnych związków węgla (RWO) w wyciągu z gleb, w tym również łąkowych, za pomocą łagodnego roztworu ekstrakcyjnego $0,01 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3} \text{ CaCl}_2$ oraz udowodniona współzależność między RWO a zawartością fosforu w wyciągu wskazuje na znaczący udział mineralizacji organicznych związków fosforu w procesie jego uwalniania z gleby.

Nieorganiczne formy fosforu – fosforany żelaza i glinu w glebach kwaśnych oraz wapnia w obojętnych i alkalicznych, ulegają rozpuszczeniu zarówno w kwasach organicznych, jak i nieorganicznych, produkowanych przez mikroorganizmy glebowe, w które bogata jest strefa korzeniowa. Proces ten przebiega zatem głównie w wierzchniej warstwie gleby i biorą w nim znaczny udział aniony organiczne [DRAKE, 1996; STEVENSON, 1965]. Ponadto, na obecność anionów organicznych znaczący wpływ ma nawożenie gleby azotem, które sprzyja ich uwalnianiu z materii organicznej [DRAKE, 1996]. W świetle powyższych rozważań, znaczne uwalnianie fosforu w inkubowanych *in situ* kwaśnych glebach z obiektów nawozowych obu doświadczeń, nawożonych saletrą amonową zachodzi w wyniku rozpuszczania wytrąconych nieorganicznych fosforanów.

Zarówno wapnowanie gleby, jak i obecność w niej kationów dwuwartościowych stymuluje uruchamianie fosforu w glebie w wyniku zwiększenia intensywności mineralizacji jego organicznych związków. Wzrost wartości pH zwiększa mobilność anionowych form fosforu – ortofosforanów oraz połączeń fosforu z rozpuszczalnymi związkami węgla (RWO) [CHARDON, SCHOUMANS, 2002]. Uzasadnia to wykazane w pracy, zwiększone uwalnianie związków fosforu w warunkach inkubacji gleby *in situ* z obiektów uprzednio wapnowanych i nawożonych saletrą wapniową, gdzie odczyn gleby jest bliski obojętnemu.

Jak podają cytowani powyżej autorzy, oprócz innych czynników, wzrost temperatury sprzyja większej dostępności fosforu w wyniku zwiększenia wydajności mineralizacji, a także większej rozpuszczalności jego form wytrąconych na kolidach glebowych. Jak wykazano w pracy, najwięcej fosforu uwalniało się w okresie pierwszego (nieraz drugiego) odrostu runi łąkowej, czemu towarzyszył wzrost temperatury otoczenia, a skutkiem była zazwyczaj największa zawartość fosforu w runi. Jak podają BARBERIS i WITHERS [2002], większość fosforu znajduje się we frakcji ilastej gleby w wyniku akumulacji zarówno jego formy organicznej, jak i nieorganicznej. Dlatego gleba zasobna w węgiel organiczny, o korzystnych warunkach wilgotnościowych z doświadczenia L po zaniechaniu nawożenia fosforem dysponuje większym zapasem tego składnika i, jak wykazano w pracy, jego uwalnianie w procesie mineralizacji zmniejsza się nie tak znacząco jak w glebie z doświadczenia J. Mimo zmniejszenia zawartości fosforu w runi łąkowej w warunkach braku nawożenia gleby tym składnikiem, zasobność w fosfor roślinności z doświadczenia L nie była mniejsza od wartości granicznej przyjętej ze względu na jakość paszy łąkowej (0,3% P) [Normy..., 2001]. Istnieje więc możliwość okresowego (co najmniej 3-letniego) zaniechania nawożenia fosforem gleb zasobnych w ten składnik oraz w próchnicę i o korzystnych warunkach wilgotnościowych.

WNIOSKI

1. Uwalnianie w procesie mineralizacji organicznych związków fosforu w glebie łąkowej mierzone w warunkach inkubacji gleby *in situ* zależy od odczynu, zawartości węgla i uwilgotnienia gleby, a także postaci stosowanego nawozu azotowego.

2. Bez względu na różnice w zawartości węgla organicznego oraz uwilgotnienia gleby nawożonej fosforem, odczyn gleby bliski obojętnemu (pH 6,8 –7,3), jako skutek następczego działania wapnowania oraz stosowania saletry wapniowej, sprzyjał uwalnianiu związków fosforu w procesie mineralizacji. Najwięcej fosforu uwalniało się w okresie pierwszego lub drugiego odrostu runi łąkowej.

3. Warunki panujące w glebie okresowo nienawożonej fosforem, zarówno silnie zakwaszonej, jak i o odczynie bliskim obojętnemu, sprzyjały uwalnianiu fosfo-

ru. W obydwóch przypadkach rozpuszczalne formy fosforu tworzą się prawdopodobnie na skutek działalności mikroorganizmów glebowych.

4. Dobra zasobność gleby w próchnicę i korzystne warunki wilgotnościowe przeciwdziałają zmniejszaniu ilości uwalnianego fosforu w warunkach okresowego zaniechania nawożenia gleby tym składnikiem.

5. W przypadku okresowego braku nawożenia fosforem gleby należy się liczyć ze zubożeniem runi łąkowej w ten składnik. W glebie zasobnej w fosfor oraz w próchnicę, o korzystnych warunkach wilgotnościowych, po początkowym spadku zawartości fosforu w runi jego ponowny wzrost gwarantuje zachowanie dobrej jakości paszy w ciągu co najmniej trzech lat.

LITERATURA

- ADAMS M.A., POLGLASE P.J., ATTIVIL P.M., 1989. In situ studies of nitrogen mineralization and uptake in forest soils; some comments on methodology. *Soil Biol. Biochem.* 21 3 s. 423–420.
- BARBERIS E., WITHERS P.J.A., 2002. Influence of soil processes on detachment of P forms: A review of experimental data. W: *Phosphorus losses from agricultural soils: Processes at the field scale*. Pr. zbior. Red. W.J. Chardon, O.F. Schoumans. Wageningen: Altera, The Netherlands s. 53–60.
- BURZYŃSKA I., 2004. Współzależność między zawartością RWO w roztworze ekstrakcyjnym 0,01 mol CaCl₂ a wybranymi składnikami mineralnymi w wodach gruntowych. *Wod. Środ. Obsz. Wiej.* t. 4 z. 2a (11) s. 525–535.
- CHARDON W.J., SCHOUMANS O.F., 2002. Solubilization of phosphorus: Concept and process description of chemical mechanisms. W: *Phosphorus losses from agricultural soils: Processes at the field scale*. Pr. zbior. Red. W.J. Chardon, O.F. Schoumans. Wageningen: Altera, The Netherlands s. 44–52.
- DEBOSZ K.K., VINTHER F.P., 1989. An in situ technique for simultaneous measurement of mineralization, leaching and plant uptake of nitrogen applied to agricultural soils. W: *Nitrogen in organic wastes applied to soils*. Pr. zbior. Red. J.A. Hansen, K. Henriksen. Academic Press.
- DRAKE M., 1965. Soil chemistry and plant nutrition. W: *Chemistry of the soil*. Pr. zbior. Red. F.E. Bear. New York: Reinhold Publishing Corporation s. 424–435.
- HAYGARTH P.M., 2000. Mechanisms and mitigation of phosphorus transfer from soil to water. W: *Conference proceedings. Scientific basis to mitigate the nutrient dispersion into the environment*. Falenty/Nadarzyn near Warsaw, December 13–14, 1999. Falenty: Wydaw. IMUZ s. 126–137.
- KILISZCZYK D., BARSZCZEWSKI J., 2006. Charakterystyka warunków meteorologicznych w rejonie doświadczeń łąkowych w Falentach. (w niniejszym zeszycie).
- Normy żywienia bydła, owiec i kóz; wartości pokarmowe pasz dla przeżuwaczy, 2001.
- SAPEK B., 1993. Studia nad wapnowaniem trwałego użytku zielonego na glebie mineralnej. Rozpr. Habil. Falenty: IMUZ ss. 93.
- SAPEK B., 1999. Ocena dynamiki mineralizacji związków azotu metodą inkubacji in situ i jego bilans w mineralnej glebie łąkowej. *Wiad. IMUZ* t. 20 z. 1 s. 39–57.
- SAPEK B., 2006. Przedmowa (w niniejszym zeszycie) s. 5–13.
- SAPEK B., BARSZCZEWSKI J., 2000. Characteristic of the long-term meadow experiments in Janki and Laszczki; a description of the sites, soils, treatment and some results. W: *Effects of liming and nitrogen fertilizer application on soil acidity and gaseous nitrogen oxide emissions in grassland systems*. pr. zbior. Red. O. Oenema, A. Sapek. Falenty: Wydaw. IMUZ s. 14–24.

- SAPEK A., SAPEK B., BARSZCZEWSKI J., 2002. Mineralizacja azotu w glebie łąki trwałej deszczowanej. Nawozy i Nawożenie s. 238–246.
- STEVENSON I.L., 1965. Biochemistry of soil. W: Chemistry of the soil. Pr. zbior. Red. F.E. Bear. New York: Reinhold Publishing Corporation s. 242–287.

Barbara SAPEK, Andrzej SAPEK

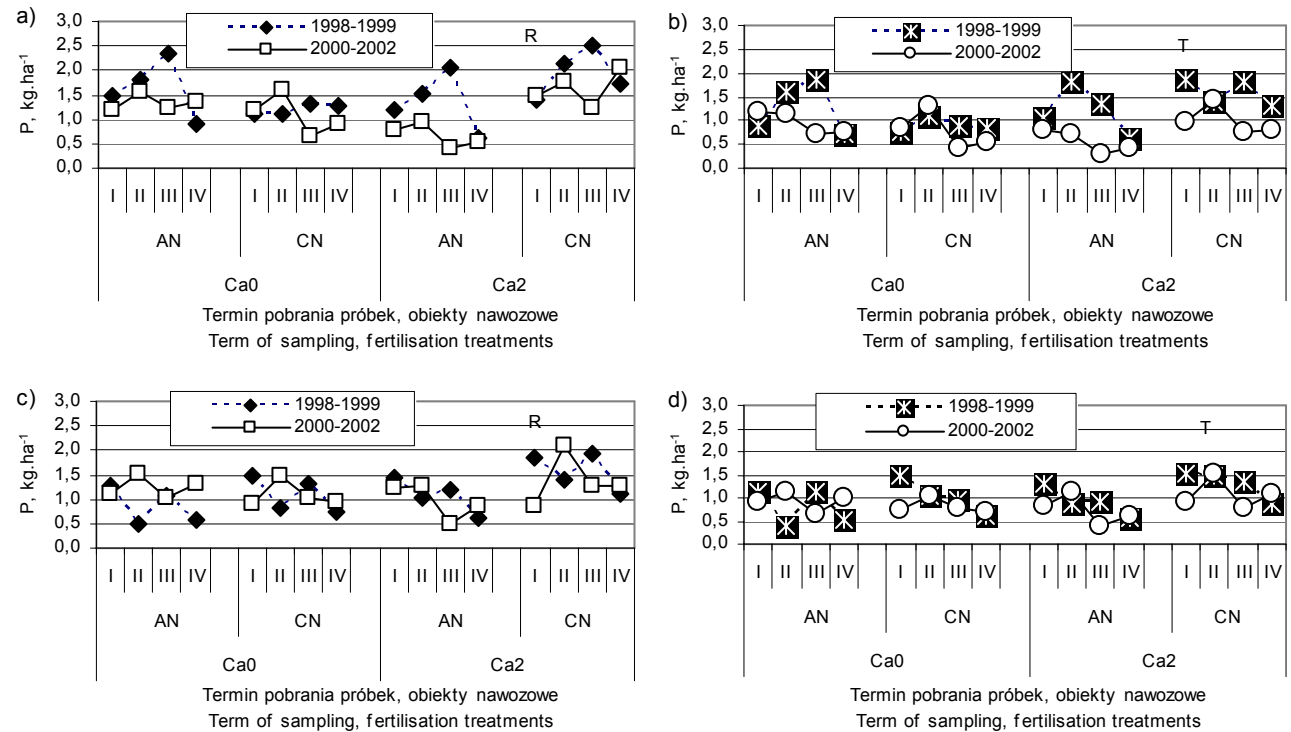
**THE RELEASE OF MINERAL FORMS OF PHOSPHORUS IN THE SOIL
AND THE CONTENT OF PHOSPHORUS IN SWARD WATERED MAINLY
WITH ATMOSPHERIC PRECIPITATION**

Key words: meadow soil, mineralization, phosphorus compounds, phosphorus fertilisation, release, vegetation

S u m m a r y

Phosphorus released in the soil of permanent meadow was analysed in the case of phosphorus fertilization and when P treatment was periodically abandoned. The *in situ* soil incubation method was used in studies on organic phosphorus mineralization. Phosphorus released due to mineralization of its organic compounds or desorption of its mineral forms showed specific dependence on pH, carbon content, soil humidity and on the forms of nitrogen fertiliser. pH near neutral favoured the release of phosphorus compounds. Temporal discontinuation of phosphorus fertilisation may result in plant impoverishment in this nutrient but fodder produced on soil rich in phosphorus and humus and of appropriate moisture will be well supplied with phosphorus for at least three years.

Praca wpłynęła do Redakcji 22.07.2005 r.



Rys. 1. Średnie zawartości fosforu w warstwie gleby 0–10 cm nawożonej fosforem (lata 1998–1999) i po zaniechaniu tego zabiegu (lata 2000–2002) w warunkach inkubacji gleby *in situ* (R) oraz w glebie pod roślinnością (T) na doświadczeniu w Jankach (a, b) i Laszczkach (c, d); nawożenie saletrą amonową – AN, nawożenie saletrą wapniową – CN; obiekty niewapnowane – C₀, obiekty wapnowane dawką wg 2Hh – C₂; terminy pobrania próbek – I–IV

Fig. 1. Mean phosphorus content in 0–10 cm layer of soil fertilized with phosphorus (years 1998–1999) and not fertilised (years 2000–2002) in soil incubated *in situ* (R) and in soil from under vegetation (T) in Janki (a, b) and Laszczki (c, d); experiments; ammonium nitrate fertilization – AN, calcium nitrate fertilization – CN; not limed treatments – C₀, treatments limed with the dose according to 2Hh – C₂; sampling terms – I–IV

Tabela 6. Porównanie wpływu saletry amonowej (AN) i saletry wapniowej (CN) w okresie nawożenia gleby fosforem (1997–1999) i zaniechania tego zabiegu (2000–2002) na zawartość fosforu w runi łąkowej

Table 6. Comparison of the effect of ammonium nitrate (AN) and calcium nitrate (CN) on phosphorus content in the sward in the period of phosphorus fertilisation (1997–1999) and after discontinuation of this treatment (2000–2002)

Rodzaj saletry Kind of saltpetre	Zawartość fosforu w runi nawożonej fosforem % s.m. Content of phosphorus in fertilised sward % d.m.			Istotność różnic AN-CN Significance of differences AN-CN	Zawartość fosforu w runi nienawożonej fosforem % s.m. Content of phosphorus in non-fertilised sward % d.m.			Istotność różnic AN-CN Significance of differences AN-CN	Średnia zawartość % s.m. Mean content % d.m.	
	1997	1998	1999		2000	2001	2002		1997–1999	2000–2002
Janki										
AN	0,311	0,330	0,417		0,276	0,233	0,302		0,356	0,270*
CN	0,298	0,330	0,400	*	0,259	0,223	0,290	*	0,343	0,258*
Laszczki										
AN	0,404	0,337	0,460		0,249	0,293	0,321		0,400	0,288*
CN	0,371	0,341	0,453	*	0,232	0,302	0,357	*	0,388	0,297*

Objaśnienia jak pod tabelą 2.

Explanations as in Tab. 2.