

MARIUSZ FOTYMA, STANISŁAW GOSEK

ELEMENTY BILANSU FOSFORU JAKO PODSTAWA NAWOŻENIA
TYM SKŁADNIKIEM

Zakład Nawożenia IUNG w Puławach

WSTĘP

Podstawowym źródłem wiedzy i zaleceń dotyczących nawożenia fosforem są w Polsce wyniki doświadczeń wieloletnich ze wzrastającymi dawkami tego składnika. Doświadczenia takie, założone w latach 1962—1964 w niemal 50 punktach na terenie całego kraju, ulegały ostatnio stopniowej likwidacji i przewiduje się całkowite ich zakończenie w 1985 r. Ostatnio opublikowano obszerną syntezę wyników 48 doświadczeń prowadzonych przez okres 12 lat i 28 doświadczeń prowadzonych przez 16 lat [7]. Synteza ta, mimo posługiwania się dosyć złożonymi metodami statystycznymi i obszernym materiałem dokumentacyjnym, nie może być w bezpośredni sposób wykorzystana w elektronicznym systemie doradztwa nawozowego. Ciekawą metodę ilościowego wyznaczania elementów bilansu fosforu, na podstawie analogicznych doświadczeń prowadzonych w NRD, zaproponowali Richter i Kerschberger [8, 9, 10]. Z uwagi na analogię zagadnienia i po porozumieniu z autorami¹ wykorzystano opracowaną w NRD metodę do powtórnej analizy wyników doświadczeń własnych.

WYZNACZANIE WSPÓLCZYNNIKÓW BILANSOWYCH FOSFORU

M e t o d y k a. Współczynnik bilansowy (Bilanzkoeffizient) jest to stosunek ilości fosforu pobranej z maksymalnym plonem roślin do optymalnej dawki nawozów, którą trzeba zastosować dla uzyskania tego plonu. Współczynniki takie obliczono według metody NRD dla każdego z 48 doświadczeń wieloletnich w sposób następujący:

¹ W tym miejscu składamy serdeczne podziękowanie Doktorowi Manfredowi Kerschbergerowi i Profesorowi Ditmarowi Richterowi za cenne wskazówki udzielone w trakcie pracy i policzenie części materiału w ośrodku obliczeniowym Institut für Pflanzenernährung w Jenie.

— dla każdego roku badań (12—16 lat) i każdego obiektu nawozowego (obiekt bez fosforu, 36 kg P_2O_5 , 72 kg P_2O_5 , 144 kg P_2O_5 na hektar na rok)² wyznaczono różnicę bilansową fosforu x odejmując pobraną ilość składnika z uzyskanym plonem rośliny od jego ilości zastosowanej w nawozach. Różnice bilansowe dla obiektu P_0 , a najczęściej i obiektu P_{36} były ujemne, dla pozostałych obiektów dodatnie. Metodą regresji wyznaczono następnie zależność pomiędzy tak wyliczoną różnicą bilansową x a różnicą plonu roślin przeliczonego na jednostki zbożowe y . Różnicę plonu obliczono dla każdego roku badań i każdego obiektu nawozowego w stosunku do uzyskanego w tym roku plonu maksymalnego. Zależność $y=f(x)$ opisywano funkcją wielomianową drugiego stopnia:

$$y = a_1 + b_1x + b_2x^2$$

Z pochodnej tej funkcji [6] wyznaczono optymalną przyrodniczo (.) i ekonomicznie (..) wartość x_{opt}

$$x_{opt.} = -\frac{b_1}{2b_2} \quad x_{opt..} = -\frac{0,02 - b_1}{2b_2}$$

gdzie: 0,02 jest przyjętym stosunkiem kosztu 1 kg P_2O_5 do wartości 1 jednostki zbożowej plonu.

Wartość $x_{opt..}$ należy rozumieć jako optymalną różnicę bilansową fosforu, przy której uzyskuje się plon roślin najbardziej (ale ekonomicznie) zbliżony do plonu maksymalnego. Wartość taką uzyskano dla każdego z analizowanych doświadczeń:

— posługując się wyliczonymi różnicami bilansowymi fosforu wyznaczono dla każdego doświadczenia zależność pomiędzy dawką nawozów z a różnicą bilansową fosforu x . Zależność $z=f(x)$ opisywano krzywą wielomianową pierwszego stopnia:

$$z = C + b_1x$$

Podstawiając do tego równania wartość $x_{opt..}$, i rozwiązując je według z , obliczono dawkę nawozów $z_{opt..}$, przy której uzyskuje się optymalną różnicę bilansową fosforu, a w konsekwencji — plon najbardziej zbliżony do plonu maksymalnego;

— odejmując od wartości $z_{opt..}$ wartość $x_{opt..}$ uzyskuje się pobranie fosforu ($E_{opt..}$) z plonem najbardziej zbliżonym do plonu maksymalnego:

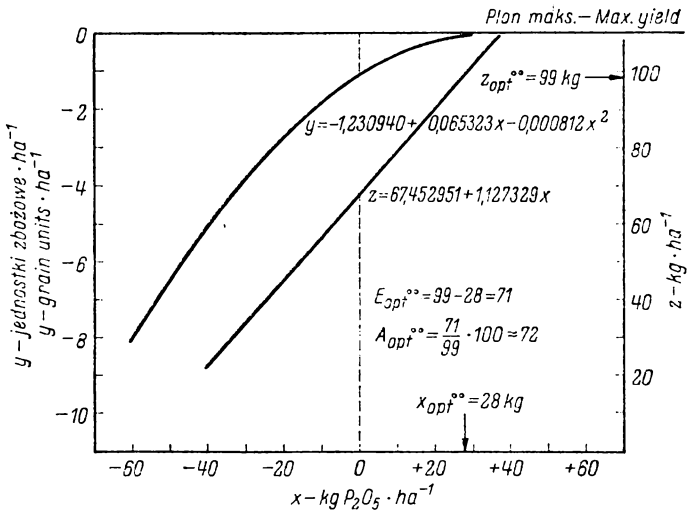
$$E_{opt..} = z_{opt..} - x_{opt..}$$

² Niezgodnie z przyjętą w Rocznikach Gleboznawczych zasadą, w pracy wyrażano zawartość fosforu zawsze w formie P_2O_5 . Wynika to z użytecznego charakteru badań i umożliwia zastosowanie ich wyników w powszechnym doradztwie nawozowym. W formie tlenkowej przedstawione są liczby graniczne zawartości fosforu w glebie.

— zgodnie z definicją podaną na wstępie metodyki, wyliczano ostatecznie współczynnik bilansowy fosforu ($A_{opt..}$) jako iloraz:

$$A_{opt..} = \frac{E_{opt..}}{z_{opt..}} \cdot 100$$

W ten sposób każde z doświadczeń, obejmujące 48 (4 obiekty \times 12 lat) do 64 (4 obiekty \times 16 lat) obserwacji, było ostatecznie scharakteryzowane trzema wartościami pomocniczymi $x_{opt..}$, $z_{opt..}$, $E_{opt..}$ i jedną wartością zasadniczą $A_{opt..}$. Przykładowe wyliczenia wartości x , z , E , A dla jednego z punktów doświadczalnych za okres 16 lat przedstawiono na ryc. 1.



Rys. 1. Wyznaczanie współczynnika bilansowego fosforu na przykładzie doświadczenia przeprowadzonego w PTR Bojanowo

y — różnica plonu w dt jedn. zb. \cdot ha^{-1} w stosunku do plonu maksymalnego w danym roku,
 x — różnica bilansowa fosforu w $kg P_2O_5 \cdot ha^{-1}$, z — dawka nawozu w $kg P_2O_5 \cdot ha^{-1}$

Fig. 1. Determination of the phosphorus balance coefficient on an example of the experiment carried out at Bojanowo

y — yield difference in grain units \cdot ha^{-1} in relation to the maximum yield in the given year,
 x — phosphorus balance difference in $kg P_2O_5 \cdot ha^{-1}$, z — fertilizer rate in $kg P_2O_5 \cdot ha^{-1}$

Średnio dla 42 analizowanych doświadczeń plon zbliżony najbardziej do plonu maksymalnego uzyskano przy dodatniej różnicy bilansowej fosforu wynoszącej $35 kg P_2O_5 \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$ (tab. 1). Do uzyskania takiej różnicy bilansowej konieczne było regularne stosowanie dawki $102 kg P_2O_5 \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$. Optymalna dawka fosforu pokrywa się dosyć dokładnie z dawką wyliczoną w cytowanej syntezie [7], wykonanej metodami klasycznymi. Średni współczynnik bilansowy fosforu wynosi 66, a więc pobranie fosforu z plonem maksymalnym stanowi 66% w stosunku do optymalnej dawki fosforu w nawozach. Odwracając tę zależność można wy-

Tabela 1

Średnie wartości charakteryzujące doświadczenia wraz z oceną ich zmienności
 Mean values characterizing the experiments, including their variability estimation

Charakterystyka Characteristics	liczebność doświad- czeń Number of experi- ments n	Różnica bilansowa Balance difference, x_{opt} kg P ₂ O ₅ ·ha ⁻¹ ·rok ⁻¹	Optymalna dawka fosforu Optimum phospho- rus rate, z_{opt} kg P ₂ O ₅ ·ha ⁻¹ ·rok ⁻¹	Wzrost fosforu z plonem maksy- malnym Phosphorus uptake with the maximum yield, B_{opt} kg P ₂ O ₅ ·ha ⁻¹ ·rok ⁻¹	Współczyn- nik bilansowy fosforu Phosphorus balance coefficient A
Średnia Mean	42 ^x	35,1	102	67	66
Odchylenie standardowe Standard deviation	-	22,51	26,1	17,0	32,5
Skrajne war- tości Extreme values	-	- 30 do 77	21 do 140	38 do 103	44 do 243
^x W pozostałych sześciu doświadczeniach zależności nie udowodniono This relationship has not been in the remaining six experiments					

Tabela 2

Wartości współczynników korelacji dla analizowanych zmiennych
 Values of correlation coefficients for the variable investigated

	Zawartość fosforu w glebie Phosphorus content in soil x_1	Procent części spławialnych Per cent of clay particles x_2	Plon maksymalny Maximum yield x_3	Procent roślin oko- powych i pastewnych Per cent of root and fodder crops x_4	pH gleby soil pH x_5
x_2	- 0,18	-	-	-	-
x_3	- 0,23	0,42	-	-	-
x_4	0,25	- 0,32	- 0,30	-	-
x_5	- 0,11	0,31	0,12	- 0,39	-
y/k/	0,33	0,53	0,02	- 0,06	0,21

liczyć wartość, przez którą należy pomnożyć pobranie fosforu z plonem, aby wyliczyć optymalną dawkę fosforu w nawozach:

$$V = \frac{100}{A_{opt}} = \frac{100}{66} = 1,51$$

lub

$$V = \left(\frac{100}{A_{opt}} - 1 \right) \cdot 100 = 51\%$$

W analizowanych doświadczeniach przeciętna optymalna dawka fosforu w nawozach była o 51% większa od ilości fosforu pobranej z plonami roślin.

Współczynnik bilansowy A miał w poszczególnych doświadczeniach bardzo różną wartość, która wahała się od 44 do 243 (tab. 1). Z wykorzystaniem regresji wielokrotnej starano się wyznaczyć czynniki, które wywierają istotny wpływ na wielkość współczynnika A . W rachunku regresji jako zmienną zależną traktowano współczynniki A y , a jako zmienne niezależne: przeciętną dla doświadczenia zawartość przyswajalnego fosforu w glebie x_1 , zawartość części sypialnych w glebie x_2 , wielkość maksymalnego plonu x_3 , procentowy udział w zmianowaniu roślin okopowych i pastewnych x_4 i przeciętną wartość pH gleby x_5 . Obliczenia i interpretację wyników wykonano w Institut für Pflanzenernährung w Jenie (tab. 2).

W dalszym ciągu metodą regresji krokowej (step-wise) eliminowano zmienne, które okazały się nieistotne przy poziomie ufności $\alpha=5\%$. W najlepiej dopasowanym modelu pozostały następujące współczynniki regresji: liniowy i kwadratowy dla x_1 (tzn. zawartości przyswajalnego fosforu w glebie), liniowy dla x_2 (tzn. zawartości części sypialnych) oraz kwadratowy — na granicy poziomu ufności dla x_3 (tzn. poziomu plonów). Wartość współczynnika bilansowego A dla fosforu jest zatem w największym stopniu uzależniona od zawartości przyswajalnego fosforu w glebie oraz od gatunku gleby, tzn. zawartości części sypialnych. Wykorzystując metodę grupowania średnich i odczytów z wykreślonych ręcznie krzywych regresji oraz dokonując pewnych ekstrapolacji w nawiązaniu do wyznaczonych wcześniej wartości w NRD, określono przybliżone wartości współczynników bilansowych fosforu w grupach składu mechanicznego i zasobności gleb w fosfor (tab. 3).

Optymalna dawka nawozów fosforowych na glebach o bardzo niskiej zawartości fosforu odpowiada pobraniu składnika z plonami roślin zwiększonemu o 82 do 122% (współczynniki 1,82—2,22). Analogicznie na glebach o wysokiej zawartości fosforu optymalna dawka nawozów odpowiada

Tabela 3

Przybliżone wartości współczynnika bilansowego A i jego odwrotności V dla gleb Polski
Approximate values of the balance coefficient A and its inverses V for Polish soils

Grupa gleb Soil group	Przedział zawartości fosforu - Phosphorus content interval							
	bardzo niska very low < 5 mg		niska - low 5-10 mg		średnia - medium 10-15 mg		wysoka - high > 15 mg	
	A	V	A	V	A	V	A	V
Bardzo lekkie Very light pl, ps	45	2,22	60	1,67	80	1,25	130	0,77
Lekkie Light pgl, pgn	50	2,00	65	1,54	85	1,18	140	0,71
Średnie Medium gl	53	1,89	70	1,43	90	1,11	145	0,70
Ciężkie Heavy ge, gc, i	55	1,82	75	1,33	95	1,05	150	0,67

pobranu fosforu z plonami roślin, zmniejszonemu o 23—33% (współczynniki 0,77—0,67). Na glebach tych można zatem gospodarować z pewnym ujemnym bilansem fosforu. Należy podkreślić, że liczebność doświadczeń, zwłaszcza 16-letnich, na glebach o średniej i wysokiej zawartości fosforu była stosunkowo niewielka i uzyskane dane są znacznie pewniejsze i bardziej reprezentatywne dla gleb o bardzo małej i małej zawartości tego składnika. Bardzo niewielką również liczbę doświadczeń zlokalizowano na glebach ciężkich wytworzonych z glin i dlatego podane tutaj wartości współczynników bilansowych mogą być obciążone dużym błędem.

WYZNACZANIE ZMIAN ZAWARTOŚCI FOSFORU PRZYSWAJALNEGO W GLEBIE

Metodyka. Zmiany zawartości przyswajalnego fosforu w glebie były uzależnione od wielkości dawek nawozów fosforowych i czasu ich stosowania, a ściślej od różnicy bilansowej fosforu. Dla ilościowego wyznaczenia tych zmienności zastosowano dwie metody oparte o rachunek korelacji i regresji. W metodzie pierwszej jako zmienną zależną y traktowano zawartość fosforu w glebie, a jako zmienną niezależną liczbę lat prowadzenia badań x . Rachunek wykonano dla każdego obiektu nawozowego (P_0 , P_{36} , P_{72} , P_{144}) oddzielnie oraz dokonując wstępnie podziału materiału doświadczalnego na grupy według wyjściowej zawartości przyswajalnego fosforu w glebie. W metodzie drugiej, opracowanej przez Kerschbergera i Richtera [9], obliczono dla każdego doświadczenia oddzielnie średnie roczne zmiany zawartości fosforu u zależnie od średnich wielkości nadwyżki bilansowej tego składnika Q zgodnie ze wzorem:

$$u = K + b_1 \cdot Q$$

gdzie K i b_1 są stałymi równania.

Dane wejściowe do rachunku regresji przygotowano w następujący sposób:

— dla każdego roku badań i każdego obiektu nawozowego wyznaczono różnicę bilansową fosforu x w sposób opisany w metodyce, cz. I. Różnice bilansowe dla kolejnych lat sumowano (rok pierwszy i drugi, pierwszy do trzeciego itd.) i dzielono przez liczbę lat n , uzyskując wartości średnie:

$$Q = \frac{\sum_1^n x}{n}$$

— dla każdego obiektu nawozowego i każdego roku badań obliczono różnicę pomiędzy aktualną zawartością fosforu i zawartością wyjściową Gd. Różnice te dzielono przez liczbę lat uzyskując średnie zmiany zawartości fosforu przyswajalnego w glebie:

$$u = \frac{Gd}{n}$$

Przy takim sposobie postępowania eliminowano przypadkowe, niekiedy duże, wartości różnic bilansowych i różnic zawartości fosforu, jakie wynikały z błędów losowych lub błędów technicznych w prowadzeniu doświadczenia.

WYNIKI OBLICZEŃ

W obiekcie kontrolnym P₀ mimo ujemnego bilansu fosforu nie stwierdzono istotnych zmian zawartości przyswajalnych form tego składnika w glebie (tab. 4). Przy bardzo małej i małej wyjściowej zawartości fos-

Tabela 4

Współczynniki równania regresji $y = a + bx$
Coefficients of the regression equation $y = a + bx$

Zawartość fosforu w glebie Phosphorus content in soil	Liczba doświadczeń Number of experiments	Współczynniki równania Equation coefficients	Dawka fosforu, kg/ha Phosphorus rate, kg/ha			
			0	36	72	144
Bardzo niska Very low < 5 mg	18	a	4,1543	4,2132	4,4821	5,1497
		b	0,0164	0,2733	0,4175	0,6308
		R	0,46	0,97	0,98	0,97
Niska Low 5-10 mg	14	a	7,1462	6,7781	7,0868	7,8348
		b	0,0179	0,2472	0,4123	0,5745
		R	0,30	0,96	0,93	0,96
Średnia i wysoka Medium and high > 10 mg	16	a	15,3888	15,3451	15,8607	16,7737
		b	-0,02933	0,1589	0,3026	0,4792
		R	0,25	0,80	0,93	0,93
Przeciętnie Mean	48	a	8,2223	8,0996	8,4437	9,2112
		b	0,0055	0,2335	0,3939	0,5700
		R	0,35	0,98	0,99	0,97
y - zawartość fosforu w mg P ₂ O ₅ /100 g gleby - phosphorus content in mg P ₂ O ₅ /100 g of soil x - upływ lat 1, 2 ... 16 - lapse of years 1, 2 ... 16						

foru zaznaczyła się nawet tendencja do pewnego wzrostu tej zawartości. Jedynie w glebach o średniej i dużej wyjściowej zawartości fosforu, przy braku nawożenia tym składnikiem wystąpił nieznaczny i nie udowodniony spadek zawartości fosforu w miarę upływu lat prowadzenia badań. We wszystkich nawożonych obiektach stwierdzono systematyczny i udowodniony przyrost zawartości przyswajalnego fosforu w glebie. Przeciętne wartości tego przyrostu wynosiły od 0,23 mg dla rocznej dawki P₃₆

do 0,57 mg $P_2O_5/100$ g gleby na rok dla dawki P_{144} . Przyrost zawartości fosforu był tym większy, im gleba wykazywała mniejszą wyjściową zawartość przyswajalnych form składnika. W przeciągu 16 lat badań wyliczony z równania regresji przeciętny dla wszystkich gleb przyrost zawartości fosforu wynosił: około 3,7 mg P_2O_5 dla dawki P_{36} , około 6 mg P_2O_5 dla dawki P_{72} i około 9 mg P_2O_5 dla dawki P_{144} .

Zmiany zawartości fosforu w glebie stanowiły wypadkową procesów pobierania P przez rośliny oraz uruchamiania i uwsteczniania składnika w glebie. W glebach obiektów kontrolnego i z najmniejszą dawką fosforu przeważały procesy uruchamiania P glebowego, gdyż mimo ujemnego bilansu składnika bądź nie stwierdzono zmian zawartości jego przyswajalnych form (obiekt P_0), bądź następował przyrost zawartości w obiekcie P_{36} . W glebach obiektów ze średnią i dużą dawką nawozów przeważały procesy uwsteczniania fosforu, gdyż przyrost zawartości przyswajalnych form P był znacznie mniejszy od wartości nadwyżki bilansowej składnika.

Dla celów doradztwa nawozowego bardziej interesująca jest zależność pomiędzy zmianą zawartości fosforu w glebie u i różnicą bilansową składnika Q . Zależność tę wyznaczono dla każdego doświadczenia oddzielnie

Tabela 5

Współczynniki równań regresji wraz z charakterystyką statystyczną
 $u = K + b_1 \cdot Q$
 Coefficients of regression equations jointly with the statistical characteristics,
 $u = K + b_1 \cdot Q$

Charakterystyka Characteristics	Liczba doświadczeń Number of experiments	Wartość współczynników Value of coefficients		$Q_1 = \frac{u - K}{b_1}$ dla $u=1$ mg for $u=1$ mg
		K	b_1	
Średnia - Średnia	45 ^x	0,160	0,0076	110
Odchylenie standardowe standard deviation	-	0,260	0,0027	-
Skrajne wartości extreme values	-	- 0,285 do 0,905	0,004 do 0,013	-
* # pozostałych trzech doświadczeniach zależności nie udowodniono This relationship has not been proved in the remaining three experiments				

cytowaną metodą [9]. W tabeli 5 przedstawiono wartości współczynników równania regresji liniowej:

$$u = K + b_1 \cdot Q$$

wraz z ich charakterystyką statystyczną. W ostatniej kolumnie tabeli zamieszczono wielkość nadwyżki bilansowej fosforu, jaka jest konieczna dla zwiększenia zawartości składnika w glebie o 1 mg $P_2O_5/100$ g gleby. Wielkość tę wyliczono z przekształcenia równania regresji

$$Q_1 = \frac{u - K}{b_1} \text{ dla } u=1 \text{ mg} \quad Q_1 = \frac{1 - 0,160}{0,0076} = 110$$

Przeciętna wartość nadwyżki bilansowej fosforu, koniecznej dla zwiększenia zawartości przyswajalnych form składnika w glebie o 1 mg $P_2O_5/100$ g gleby, wynosi więc: 110 kg P_2O_5 na ha.

Współczynniki regresji i współczynniki Q_1 miały w poszczególnych doświadczeniach bardzo różne wartości. Z wykorzystaniem regresji wielokrotnej starano się znaleźć związek pomiędzy wielkością tych współczynników a skwantyfikowanymi cechami gleby, takimi jak procent części spławialnych x_1 , wyjściowa zawartość przyswajalnego fosforu x_2 i odczyn pH gleby x_3 .

Korelacje interesujących zmiennych były stosunkowo luźne (tab. 6). Stwierdzono jednak istotny związek wartości K i b_1 , a szczególnie war-

T a b e l a 6

Wartości współczynników korelacji dla analizowanych zmiennych
Values of correlation coefficients for the variables analyzed

	K	b_1	x_1	x_1	x_2
b_1	+ 0,21	-	-	-	-
Q_1	- 0,71	- 0,76	-	-	-
x_1	- 0,18	+ 0,22	- 0,13	-	-
x_2	- 0,52	- 0,31	- 0,50	- 0,10	-
x_3	+ 0,15	+ 0,13	- 0,12	+ 0,10	+ 0,31

x_1, b_1, Q - z tabeli 5 - K, b_1, Q - as in Table 5

x_1 - procent części spławialnych, x_2 - zawartość fosforu w glebie, x_3 - pH gleby

x_1 - per cent of clay particles, x_2 - phosphorus content in soil, x_3 - soil pH

tości Q_1 , z zawartością przyswajalnego fosforu w glebie x_2 oraz związek bliski istotnemu wymienionych zmiennych z zawartością w glebie cząsteczek spławialnych x_1 . Analizując bliżej te zależności stwierdzono, że nadwyżka bilansowa fosforu konieczna dla zwiększenia zawartości przyswajalnego składnika w glebie o stałą wartość (na przykład o 1 mg) jest tym mniejsza, im gleba wykazywała większą wyjściową zawartość fosforu oraz mniejsza na glebach średnich i ciężkich w stosunku do gleb bardzo lekkich i lekkich (tab. 7). Z uwagi na bardzo nierównomierny rozkład liczebności doświadczeń w grupach gleb zróżnicowanych pod względem zawartości fosforu i składu mechanicznego, zrezygnowano z wyznaczania równań regresji dla każdej z tych grup lub też z posługiwania się równaniem regresji wielokrotnej. Współczynniki regresji oraz wyznaczone z tych równań wartości Q_1 dla gleb o zróżnicowanej zawartości fosforu należy zwiększyć o 10% na glebach bardzo lekkich i lekkich, a zmniejszyć o 10% na glebach średnich i ciężkich.

Tabela 7

Współczynniki równań regresji i wartość Q_1 dla różnych gleb
 $u = K + b_1 \cdot Q$
 Coefficients of regression equations and Q_1 values for different soils
 $n = K + b_1 \cdot Q$

Zawartość pryswajalnego fosforu Available phosphorus content	Współczynniki regresji Regression coefficients		Wartość Q_1 /dla $u=1 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ gleby/ Values of Q_1 /for $n=1 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ of soil/		
	K	b_1	przeciętna Average	dla gleb - for soils	
				bardzo lekkich i lekkich very light and light	średnich i ciężkich medium and heavy
Bardzo niska < 5 mg Very low	0,154	0,0069	123	135	110
Niska 5, 1-10 mg Low	0,156	0,0076	111	122	100
Średnia i wysoka Medium and high > 10 mg	0,171	0,0083	100	110	90

WYZNACZANIE DAWEK NAWOZÓW FOSFOROWYCH

Można wyróżnić dwa zasadnicze rozwiązania tego zadania. W rozwiązaniu optymalizacyjnym wyznacza się dawkę nawozów zapewniającą uzyskanie maksymalnego (możliwego w danych warunkach) plonu roślin na określonej glebie. Zakłada się wówczas, że gospodarstwo ma możliwość zakupu dowolnej ilości nawozów. W rozwiązaniu alokacyjnym poszukuje się sposobu optymalnego rozdysponowania określonej puli nawozów, tak aby uzyskać największy efekt globalny w postaci przyrostu zbiorów. Przy ograniczonej ilości nawozów, dawki ich w poszczególnych gospodarstwach i na poszczególnych polach będą oczywiście mniejsze od dawek optymalnych.

Rozwiązanie optymalizacyjne. W rozwiązaniu tym należy się posługiwać współczynnikami bilansowymi dla fosforu. Po ustaleniu wielkości oczekiwanego plonu roślin oblicza się ilość fosforu, jaką rośliny muszą pobrać z gleby i nawozów. W tym celu można wykorzystać tabele jednostkowego pobrania składników z plonem danej rośliny [6]. Pobranie fosforu należy zwiększyć o wielkość wynikającą ze współczynnika bilansowego dla określonych warunków glebowych (tab. 3), wyliczając optymalną dawkę nawozów zgodnie ze wzorem:

$$P = E_p + E_p \cdot \left(\frac{100}{A_{\text{opt}}} - 1 \right) \text{ lub } P = E_p \cdot \frac{100}{A_{\text{opt}}}$$

gdzie:

P — optymalna dawka fosforu w nawozie,

E_p — pobranie fosforu z oczekiwanym plonem,

A_{opt} — współczynnik bilansowy (z tab. 3).

Ze wzoru tego wynika również w sposób bezpośredni wielkość nadwyżki bilansowej fosforu Q :

$$Q = P - E_p$$

Wartość Q dla gleb o bardzo małej, małej i średniej zawartości fosforu będzie dodatnia, a dla gleb o dużej zawartości (>15 mg na 100 g gleby) przybiera znak ujemny (tab. 3). Wartość tę można podstawić do odpowiedniego równania regresji z tab. 7 i wylicza się przyrost zawartości przyswajalnego fosforu w glebie, jaki będzie towarzyszył zastosowaniu odpowiedniej dawki nawozów. Rachunek optymalizacyjny lepiej jest prowadzić dla całego obiegu zmianowania z następnym podziałem wyliczonej dawki nawozów pod poszczególne, uprawiane w tym zmianowaniu rośliny. Postępowanie takie daje następujące korzyści:

— umożliwia prawidłowe uwzględnienie fosforu z obornika, którego efekt rozciąga się na kilka lat,

— stwarza możliwość kontroli poprawności nawożenia na drodze okresowego (co 4—5 lat) oznaczania zawartości przyswajalnego fosforu w glebie,

— zapewnia uwzględnienie wrażliwości poszczególnych gatunków roślin na niedobór fosforu w glebie.

Rozwiązanie alokacyjne. W rozwiązaniu tym należy uwzględnić pulę nawozową, jaka pozostaje do dyspozycji gospodarstwa lub innej jednostki obszarowej. Przede wszystkim wylicza się całkowitą ilość nawozów zgodnie z postępowaniem optymalizacyjnym. Ilość ta będzie oczywiście większa od tej, która pozostaje do dyspozycji. W dalszym ciągu dokonuje się zwiększenia wartości współczynników bilansowych (z tab. 3) zachowując ich proporcje podane w tej tabeli dla określonych warunków glebowych. Zwiększenie wartości współczynników powoduje spadek zapotrzebowania na nawozy, ale kosztem wielkości plonów roślin. W wyniku „krokowego” postępowania dochodzi do zrównania wyliczonej i pozostającej do dyspozycji puli nawozowej. Do dokonywania wyliczeń trzeba z reguły korzystać z pomocy odpowiednio oprogramowanej maszyny elektronicznej.

DYSKUSJA WYNIKÓW

Koncepcja współczynników bilansowych (jakkolwiek inaczej nazywanych) nie jest nowa. Współczynniki były od dłuższego czasu wykorzystywane w różnych, zwłaszcza niemieckich, systemach nawożenia. Buchner i Sturm [1] podają mnożnikowe wartości takich współczynników określonych jako Klassenfaktor, dla wyróżnionych przedziałów zawartości fosforu w glebie. W przedziale zawartości bardzo małej wartości współczynnika wynoszą tam 2,5—3,5, małej — 2,0—2,5 i średniej — 1,5.

Dawka fosforu w nawozach stanowi iloczyn pobrania składnika z plonami roślin i odpowiedniego Klassenfaktor.

W Bawarii stosuje się współczynniki sumujące [2], które wynoszą odpowiednio 90, 40 i 10 kg P_2O_5 na glebach o bardzo małej, małej i średniej zawartości fosforu. Dawka fosforu w nawozach stanowi sumę pobrania składnika z plonami roślin i odpowiedniego naddatku fosforu na poprawę zasobności gleby. Doświadczalne uzasadnienie współczynników bilansowych na podstawie wyników wieloletnich doświadczeń z nawożeniem fosforem można jednak znaleźć po raz pierwszy w cytowanej pracy Kerschbergera i Richtera [10]. Współczynniki wyznaczone przez tych autorów mają wartości bardzo zbliżone do wynikających z podsumowania doświadczeń przeprowadzonych w naszym kraju. Dla gleb o niskiej, średniej i wysokiej zawartości fosforu podano odpowiednio wartości A 46, 67 i 141, a więc niemal dokładnie odpowiadające analogicznym wartościom dla Polski (tab. 3).

Nadwyżki bilansowe fosforu, jakie zgodnie z przedstawioną koncepcją należy stosować na glebach wykazujących małą i średnią zawartość przyswajalnego składnika, prowadzą do systematycznego zwiększania tej zawartości. W licznych badaniach [4] starano się ustalić ilościowe zależności pomiędzy dawką fosforu lub nadwyżką bilansową P a przyrostem zawartości przyswajalnej formy tego składnika w glebie. Fotyma i Kęsik [4] zestawili wartości tzw. równoważników bilansowych fosforu. Równoważnik bilansowy odpowiada przyrostowi zawartości fosforu na jednostkę zastosowanej nadwyżki bilansowej tego składnika. Przeciętna wartość równoważnika bilansowego w zestawionych badaniach wynosiła 0,30, tzn. dla uzyskania przyrostu zawartości przyswajalnej formy składnika w glebie o jednostkę należy zastosować około trzech jednostek nadwyżki bilansowej fosforu.

W badaniach własnych w celu zwiększenia zawartości fosforu o 1 mg P_2O_5 na 100 g gleby trzeba było zastosować przeciętnie 110 kg nadwyżki bilansowej fosforu. Przyjmując że 1 mg P_2O_5 na 100 g gleby odpowiada 30 kg fosforu w warstwie ornej, wartość równoważnika bilansowego fosforu wynosi 0,27. W równolegle prowadzonych badaniach w NRD nadwyżki bilansowe fosforu, konieczne do zwiększenia zawartości P w glebie o 1 mg, były o kilkanaście procent mniejsze w porównaniu z wyliczeniami na podstawie badań polskich. Świadczy to o większym niż w NRD uwstecznianiu fosforu stosowanego w nawozach w glebach naszego kraju. Jedną z przyczyn tego stanu rzeczy może być silne zakwaszenie gleb Polski [11].

Współczynniki bilansowe i równoważniki bilansowe fosforu są wykorzystywane w sformalizowanych systemach doradztwa nawozowego z pomocą maszyn elektronowych. Opis stosowanych na skalę produkcyjną systemów programowanego doradztwa nawozowego można znaleźć w końcowym sprawozdaniu grupy roboczej RWPG (Zbiorowa 1981). W NRD

dawka nawozów fosforowych była dotychczas ustalana na podstawie następującego wzoru:

$$P = E \cdot A - \left(\frac{OD_F \cdot a \cdot 60}{100} \right) - \left(\frac{OD_{VF} \cdot a \cdot 40}{100} \right) \pm ZA_{FN} \pm ZA_F$$

gdzie:

P — optymalna dawka fosforu w nawozach,

$E \cdot A$ — pobranie fosforu z oczekiwanym plonem,

OD_F i OD_{VF} — dawka nawozów organicznych odpowiednio pod daną roślinę i pod jej przedplon,

a — równoważnik nawozowy fosforu z nawozów organicznych,

ZA_{FN} — nadwyżka bilansowa fosforu (dodatnia lub ujemna) zależnie od zawartości składnika w glebie,

ZA_F — zwiększenie lub zmniejszenie dawki fosforu zależnie od wrażliwości rośliny na niedobór składnika w glebie.

W polskim systemie programowanego doradztwa nawozowego PDN (1977) wylicza się dawkę fosforu na podstawie uproszczonego bilansu tego składnika w glebie zgodnie ze wzorem:

$$P = E \cdot A + ZA_{FN} - OD_F$$

Dla jasności przyjęto oznaczenia jak we wzorze dla NRD. Wartość nadwyżki bilansowej ZA_{FN} wyznaczono w połowie lat 70-tych [3] wykorzystując dwie pierwsze rotacje zmianowań w tych samych doświadczeniach, których analiza stanowi przedmiot dyskutowanej pracy. Uzyskane wówczas równanie regresji miało następującą postać:

$$y = 0,412359 - 0,104776x_1 + 0,015890x_2 + 0,007331x_3$$

gdzie:

y — zmiana zawartości fosforu w glebie (odpowiada symbolowi u w omawianej pracy),

x_1 — kompleks przydatności rolniczej gleb,

x_2 — wyjściowa zawartość fosforu w glebie,

x_3 — różnica bilansowa fosforu (odpowiada symbolowi Q w omawianej pracy).

Współczynnik przy x_3 miał niemal analogiczną wartość jak współczynnik przy Q (tab. 5), do wyznaczenia którego wykorzystano trzecią i czwartą rotację zmianowań tych samych doświadczeń. W omawianej pracy zrezygnowano jednak z wprowadzenia kompleksu glebowego i wyjściowego zawartości fosforu do równania regresji wielokrotnej i posłużono się równaniami regresji prostej dla przedziałów zawartości przyswa-

jalnego fosforu w glebie (tab. 7). Postępowanie takie wydaje się prostsze i bardziej bezpieczne, gdyż unika się możliwych korelacji wewnętrznych (interkorelacji) uwzględnionych w rachunku regresji zmiennych.

DEFINICJE I WNIOSKI

— Współczynnik bilansowy jest to stosunek ilości fosforu, pobranej z maksymalnym plonem roślin, do optymalnej dawki nawozów, którą trzeba zastosować w celu uzyskania tego plonu. Wartości współczynników bilansowych A pozostają w granicach od 45 do 150 i zależą od składu mechanicznego gleby i jej zasobności w fosfor. Współczynniki bilansowe wyznaczone w NRD i Polsce mają bardzo podobne wartości.

— Równoważnik bilansowy fosforu odpowiada przyrostowi zawartości przyswajalnej formy P w glebie na jednostkę nadwyżki bilansowej tego składnika. Przeciętna wartość równoważnika bilansowego w Polsce wynosi 0,27, tzn. dla zwiększenia zawartości przyswajalnego fosforu w glebie o 1 mg $P_2O_5/100$ g gleby (tzn. około 30 kg na hektar w warstwie ornej) należy zastosować 110 kg nadwyżki bilansowej fosforu. Równoważnik bilansowy w Polsce jest mniejszy niż w NRD, tzn. w celu uzyskania tego samego przyrostu zawartości fosforu w glebie trzeba zastosować większą o kilkanaście procent nadwyżkę bilansową fosforu.

— Współczynniki bilansowe i równoważniki bilansowe fosforu stanowią podstawy systemów programowanego doradztwa nawozowego z wykorzystaniem maszyny elektronicznej.

LITERATURA

- [1] Buchner A., Sturm H.: Gezielter Düngen. DLG Verlag, Frankfurt (Main) 1980.
- [2] Finck A.: Fertilizers and fertilization. Verlag-Chemie, Weinheim 1982.
- [3] Fotyma M., Adamus M., Filipiak K., Gosek S., Kozłowska H.: Opracowanie wskaźników optymalizacji nawożenia fosforem. Pam. puł. 1976, 66, 75—89.
- [4] Fotyma M., Kęsik K.: Skutki intensywnego nawożenia fosforem. Post. Nauk rol. 1978, 2, 45—60.
- [5] Fotyma M., Kęsik K.: Stan i perspektywy badań w zakresie przemian fosforu w glebie i nawożenia tym składnikiem. Prace Akademii Ekonomicznej Wrocław 1984, nr 267, 67—90.
- [6] Fotyma M.: Prawa i funkcje nawozowe. W: Nawożenie. 1964.
- [7] Gosek S., Adamus M., Fotyma M., Kozłowska H.: Wpływ dużych dawek nawozów fosforowych na plony roślin oraz bilans i zawartość przyswajalnego fosforu w glebie. Pam. puł. 1984.
- [8] Kerschberger M., Richter D.: Untersuchungen zur Erhöhung des P-Gehaltes im Boden (DL-Methods). Arch. Acker., Pflanzenbau, Bodenkd. 16, 1972, 915—919.

- [9] Kerschberger M., Richter D.: Beitrag zur Ermittlung der für die Erhöhung des Gehaltes an DL-löslichen Phosphat im Boden notwendigen P-Düngermengen. Arch. Acker., Pflanzenbau Bodenkd. 22, 1978, 755—762.
- [10] Kerschberger M., Richter D.: Ermittlung von Bilanzkoeffizienten für die P-Düngerbemessung. Arch. Acker., Pflanzenbau, Bodenkd. 22, 1978, 559—567.
- [11] Kęsik K., Fotyła M.: Wpływ wapnowania na stan fosforowy gleb. Prace Akad. Ekon. Wrocław. 1984, nr 267, 90—98.
- [12] PDN programowane doradztwo nawozowe, teoretyczne podstawy doradztwa oraz dokumentacja programowa systemu. Puławy 1977.
- [13] Zbiorowa — Razrabotka putiej rieszenii dla opriedielenija z pomoszczuju EWM rekomendacji po izpolzowaniju udobrienij w stranach-czlenach SEW. Lipsk 1981.

М. ФОТЫЛА, С. ГОСЕК

ЕЛЕМЕНТЫ БАЛАНСА ФОСФОРА КАК ОСНОВА УДОБРЕНИЯ ЭТИМ ЭЛЕМЕНТОМ

Отдел удобрения Института агротехники, удобрения и почвоведения в Пулавах

Резюме

Основу знаний и рекомендаций в области удобрения фосфором составляют в Польше результаты многолетних опытов по удобрению этим элементом, проводимых в начале 1960-тых годов. Эти результаты были подвергнуты повторной разработке при использовании метода предложенного Кербергером и Рихтером в ГДР [8, 9, 10]. Указанные результаты позволили определить значения коэффициентов и эквивалентов баланса фосфора. Значения балансовых эквивалентов помешались в пределах 45—150 и были очень сходными с полученными в ГДР. Среднее значение балансового эквивалента фосфора составляло 0,27 и было на около 15—20% меньше, чем в ГДР. Повышение содержания усвояемого фосфора в почвах Польши требует, следовательно, применения высших балансовых прибавок этого элемента, чем в ГДР. Приводится концепция использования коэффициентов и эквивалентов баланса фосфора в оптимизационной и аллокационной системе удобрения этим элементом. Обе системы нуждаются в применении электронной вычислительной техники.

М. ФОТЫЛА, С. ГОСЕК

PHOSPHORUS BALANCE ELEMENTS AS A BASIS OF FERTILIZATION WITH THIS NUTRIENT

Department of Fertilization,
Institute of Soil Science and Cultivation of Plants at Puławy

Summary

A basis of knowledge and recommendations in the scope of fertilization with phosphorus constituted in Poland the results of long-term experiments on fertilization with this element, carried out since early 1960ies. These results were subjected to a repeated elaboration using the method proposed by Kerschberger and Richter in the GDR [8, 9, 10]. In consequence the values of phosphorus balance coefficients and equivalents have been determined. Values of the balance coefficients occur within the limits of 45—150 and closely approximate those obtained in the GDR.

Mean values of the balance equivalent of phosphorus amounted to 0.27 and was by dozen or so per cent less than in the GDR. An increase of the content of available phosphorus in Polish soils requires thus application of higher balance surplusses of this element than in the GDR. The concept of utilization of the phosphorus balance coefficients and equivalents in an optimization and allocation system of fertilization with this element is presented. Both systems require application of the electronic computation technique.

*Prof. dr Mariusz Fotyma
Osada Pałacowa — IUNG
24-100 Puławy*

Wpłynęło do redakcji 1984.06.24