

Rozwój systemu korzeniowego kukurydzy w zależności od umieszczenia nawozu w glebie

Piotr Ochal, Tamara Jadczyszyn, Beata Jurga

Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia
Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy w Puławach
ul. Czarotoryskich 8, 24-100 Puławy, Polska

Abstrakt. W uproszczonych systemach uprawy nawozy są aplikowane powierzchniowo, co skutkuje wertykalnym zróżnicowaniem stężenia składników pokarmowych w warstwie gleby penetrowanej przez system korzeniowy roślin. W nowej technologii uprawy kukurydzy, zaproponowanej w ramach projektu Azomais, finansowanego przez NCBiR, nawozy aplikowane są dogłębowo w celu ułatwienia roślinom dostępu do składników pokarmowych. Jednym z podstawowych zagadnień wymagających rozstrzygnięcia, było określenie optymalnej głębokości aplikacji nawozu. W latach 2014–2015 przeprowadzono dwuczynnikowe doświadczenie w rizoboksach, którego celem było określenie wpływu rozmieszczenia nowego specjalistycznego nawozu azotowo-fosforowego z mikroelementami na rozwój systemu korzeniowego kukurydzy. Schemat doświadczenia uwzględniał trzy głębokości umieszczenia granul dużych nawozu: 20, 25 lub 30 cm od powierzchni gleby i trzy głębokości umieszczenia granul standardowych nawozu: 2, 5 lub 8 cm poniżej ziarna kukurydzy. Badano wpływ sposobu aplikacji nawozu na rozwój systemu korzeniowego kukurydzy. Określono: powierzchnię, długość, średnicę, objętość, świeżą i suchą masę korzeni oraz świeżą i suchą masę części nadziemnej roślin. Obliczono także gęstość objętościową korzeni. Najwyższymi wartościami większości badanych parametrów charakteryzowały się rośliny uprawiane w obiektach, w których granule duże nawozu były umieszczone na głębokości 25 cm, a granule standardowe na głębokości 2 i 5 cm. Natomiast najniższe wartości stwierdzono w obiektach, gdzie granule ułożono na głębokości 5+20 cm. Na podstawie przeprowadzonego eksperymentu zasadne wydaje się lokowanie granul dużych na głębokości 25 cm od powierzchni gleby a granul standardowych na głębokości 2 lub 5 cm od ziarniaka.

słowa kluczowe: kukurydza, system korzeniowy, zlokalizowane nawożenie, nawóz UreaPhos(Mikro), Delta-T Scan, gęstość objętościowa korzeni

WSTĘP

Kukurydza jest obecnie jedną z podstawowych roślin uprawnych w Polsce. O jej znaczeniu świadczy zwiększenie powierzchni zasiewów kukurydzy na ziarno z 300 tys. ha w 2005 r. do 650 tys. ha w 2014 r. i powierzchni zasiewów kukurydzy kiszonkowej z 326 tys. ha do 462 tys. ha. W 2012 r. produkcja kukurydzy na ziarno sięgała blisko 2 mln ton, a w 2014 już niemal 4,5 mln ton (GUS, 2015). Konieczność konkurencji o rynki zbytu, a także względy środowiskowe inspirują do poszukiwania oszczędnych, niskonakładowych technologii produkcji. Znaczną obniżkę kosztów można uzyskać dzięki uproszczeniu zabiegów uprawy roli. Uproszczenia mogą przyjmować różne formy: od zastąpienia uprawy płużnej bronowaniem lub kultywatorowaniem (z ang. *reduce tillage*), poprzez uprawę pasową (z ang. *strip tillage*) aż do uprawy zerowej (z ang. *no till*), czyli wysiewu nasion specjalistycznym siewnikiem w nieuprawioną glebę, bezpośrednio w ściernisko lub w mulcz (Jadczyszyn, 2015). W uproszczonych systemach uprawy obserwuje się płytsze rozmieszczenie systemu korzeniowego. Skutkiem tego jest ograniczenie możliwości pobierania przez rośliny składników pokarmowych nawet w warunkach optymalnej zasobności gleby (Grzesiak, 2009; Fageria, 2013).

Prawidłowy rozwój systemu korzeniowego zaopatrującego rośliny w wodę i składniki pokarmowe ma kluczowe znaczenie dla plonowania. Bardzo ważną rolę odgrywa głębokość ukorzeniania oraz objętość korzeni i ich rozmieszczenie w glebie (Fageria, 2013; Paluszek, 2011). Czynniki te determinują wielkość strefy, z której rośliny mogą pobierać wodę i składniki pokarmowe, co przekłada się na odporność roślin na stresy biotyczne i abiotyczne (Castronguay i in., 2006). Uważa się, że zwiększone pobieranie wody związane z rozbudowanym i głębokim systemem korzeniowym jest kluczowym dla roślin mechanizmem ochrony przed stresem suszy (Fageria, 2013). Jednym z parametrów opisujących stan systemu korze-

Autor do kontaktu:

Piotr Ochal
e-mail: pochal@iung.pulawy.pl
tel. +48 81 4786 842

Praca wpłynęła do redakcji 28 grudnia 2015 r.

niowego jest gęstość objętościowa korzeni (RLD). Jest to stosunek całkowitej długości korzeni do objętości gleby, z której te korzenie pochodzą (Fageria, 2013). Parametr ten jest pośrednim wskaźnikiem wielkości ryzosfery, tj. strefy oddziaływania korzeni na glebę. RLD jest szczególnie ważny dla oceny zdolności pobierania przez roślinę jonów mało mobilnych w roztworze glebowym, jak np. jony fosforu (Peng i in., 2012; Jing i in., 2012), a w mniejszym stopniu wody i jonów mobilnych (np. NO_3^-) (Gao i in., 2010).

Innowacyjna uproszczona technologia uprawy kukurydzy opracowana przez konsorcjum instytutów naukowo-badawczych, w ramach projektu finansowanego przez NCBiR, zastępuje wszystkie zabiegi uprawowe z wyjątkiem zabiegów ochrony roślin. Podczas jednego przejazdu agregatu uprawowo-siewnego wykonywane są siew nasion i wgłębna aplikacja nawozu w nieuprawioną glebę. Na potrzeby tej technologii opracowano nową formułę wolnodziałającego nawozu azotowo-fosforowego z mikroelementami w formie dwójakiego rodzaju granul, tj. granul standardowe do nawożenia startowego o średnicy 2–5 mm i granul duże o średnicy 8–10 mm, w postaci których aplikowana jest główna dawka składników pokarmowych. Dla uzyskania pożądaných efektów produkcyjnych należało określić optymalny sposób lokalizacji nawozu w glebie, który zapewni łatwy dostęp do składników pokarmowych przez cały okres wegetacji roślin. Założono, że nawóz będzie aplikowany w dawce startowej w pobliżu nasion kukurydzy, a główna dawka składników będzie podawana głębiej, by stymulować lepsze ukorzenienie roślin.

Celem badań było wyznaczenie optymalnej głębokości umieszczenia granul standardowych (dawki startowej) i granul dużych (dawki głównej) nawozu NPS(M) o roboczej nazwie „UreaPhos(Mikro)”.

MATERIAŁY I METODY

Podstawę badań stanowiło dwuczynnikowe modelowe doświadczenie przeprowadzone w rizoboksach w latach 2014–2015 w hali wegetacyjnej Instytutu Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowego Instytutu Badawczego w Puławach. W każdym rizoboksie uprawiano 1 roślinę kukurydzy średniowczesnej odmiany Magello, firmy Saatbau Polska Sp. z o.o. (FAO 230–250). Siew kukurydzy przeprowadzono wiosną na głębokość 2 cm. Czynnikiem pierwszym była głębokość umieszczenia granul dużych o średnicy 8–10 mm – 20, 25 i 30 cm od powierzchni gleby, a czynnikiem drugim – głębokość umieszczenia granul standardowych o średnicy 2–5 mm – 2, 5 lub 8 cm poniżej ziarna kukurydzy. Doświadczenie prowadzono w trzech powtórzeniach. Wszystkie kombinacje przedstawiono w tabeli 1.

Rizoboksy wykonano z pleksiglasu o wymiarach zewnętrznych: wysokość 40 cm, szerokość 35 cm i głębokość 4 cm, objętość wewnętrzna wynosiła 2913,6 cm³. Przednia

Tabela 1. Kombinacje umieszczania nawozu UreaPhos(Mikro) (fot. 1) na różnych głębokościach

Table 1. Combinations of experimental design for placing UreaPhos(Mikro) (fig. 1) fertilizer at different depths.

Lp. No.	Głębokość umieszczenia nawozu [cm] Depth of placing fertilizer [cm]	
	czynnik I głębokość umieszczenia granul dużych od powierzchni gleby factor I The depth of big granules from the soil surface	czynnik II głębokość umieszczenia granul standardowych od ziarniaka factor II The depth of standard granules from the caryopsis
1	20	2
2	20	5
3	20	8
4	25	2
5	25	5
6	25	8
7	30	2
8	30	5
9	30	8

ściana rizoboksu była przezroczysta, z możliwością jej demontażu. Ściana ta była przysłonięta ciemną folią w celu zapewnienia ochrony dla prawidłowego wzrostu korzeni. Rizoboksy były ustawione w stojakach pod kątem 60° do powierzchni ziemi, aby zapewnić wzrost korzeni zgodnie z grawitropizmem, w kierunku przezroczystych ścian rizoboksu. Dzięki takiej konstrukcji istniała możliwość ciągłej obserwacji systemu korzeniowego bez uszczerbku dla roślin (www.inhort.pl).

Rizoboksy wypełniono substratem składającym się z gleby płowej i piasku w proporcji 3 kg : 2 kg. Substrat charakteryzował się pH_{KCl} 5,75 i następującą zawartością składników pokarmowych (mg·kg⁻¹ gleby): P_2O_5 – 86,7, K_2O – 111, Mg – 47. We wszystkich obiektach doświadczenia zastosowano przedsięwzięcie takie same dawki składników pokarmowych: 1,0 g N, 0,5 g P_2O_5 , 1,25 g K_2O , 0,3 g Mg, 5,0 g CaCO_3 + mikroelementy na 1 rizoboks. W każdym obiekcie stosowano nawóz UreaPhos(Mikro) (fot. 1) o następującym składzie chemicznym: N – 200, P – 43,6, S – 70, Cu – 1,5, Zn – 3, B – 0,6 g·kg⁻¹, oraz dodatkowo potas w formie KCl, magnez w postaci MgSO_4 oraz węglan wapnia CaCO_3 . Przy obsadzie 80000 roślin·ha⁻¹ można założyć, że dawki nawozów były równe: 80 kg N·ha⁻¹, 40 kg P_2O_5 ·ha⁻¹, 100 kg K_2O ·ha⁻¹, 24 kg Mg·ha⁻¹, 400 kg CaCO_3 ·ha⁻¹, co odpowiada jednej z dawek aplikowanej w prowadzonym równolegle doświadczeniu polowym w ramach projektu.

Wilgotność podłoża utrzymywano na poziomie 60% polowej pojemności wodnej. Podczas wegetacji prowadzono dokumentację fotograficzną rozwoju systemu korzeniowego. Zbiór dokonano w fazie 9–10 liści (43 dni



Fot. 1. Nawóz specjalistyczny do uprawy kukurydzy UreaPhos(Mikro)

Fig. 1. Maize-specialized fertilizer UreaPhos(Mikro).

od siewu). Po zbiorze i umyciu systemu korzeniowego dla każdej z roślin określano: długość, powierzchnię, średnicę, objętość, świeżą i suchą masę korzeni. Długość, powierzchnię i średnicę mierzono za pomocą skanera z oprogramowaniem Delta T-Scan. Objętość systemu korzeniowego określono w cylindrze wypełnionym wodą. Określono także świeżą i suchą masę części nadziemnej roślin.

Na podstawie uzyskanych pomiarów sumarycznej długości korzeni i znanej objętości gleby w rizoboksach wyznaczono wskaźnik RLD (*root length density*), zgodnie z podanym w literaturze wzorem (Fageria, 2013):

$$\text{gęstość objętościowa korzeni} = \frac{\text{całkowita długość korzeni [cm]}}{\text{objętość gleby, z której pobrano korzenie [cm³]}}$$

Uzyskane wyniki opracowano statystycznie przy użyciu programu Statistica 10.1, metodą analizy wariancji, posługując się przedziałem ufności Tukeya, przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

WYNIKI BADAŃ

Wschody, wzrost i rozwój roślin kukurydzy przebiegały prawidłowo. Regularne obserwacje korzeni ujawniły, że ich wzrost zatrzymywał się na głębokości umieszczenia nawozu i dopiero po kilku dniach korzenie przerastały w głąb rizoboksu (fot. 2). Analiza wariancji wykazała statystycznie istotny wpływ czynnika pierwszego (głębokość aplikacji granul dużych) na: świeżą i suchą masę korzeni, ich objętość, na świeżą i suchą masę części nadziemnej ro-

ślin oraz gęstość objętościową korzeni (tab. 2). Nie wykazano istotnego wpływu czynnika drugiego, tj. głębokości aplikacji granul standardowych, na badane parametry. Nie stwierdzono interakcji pomiędzy analizowanymi czynnikami.

Analiza średnich dla czynnika I wykazała, że najwyższe wartości parametrów rozwoju systemu korzeniowego uzyskano umieszczając granule duże na głębokości 25 cm. Słabsze wskaźniki rozwoju systemu korzeniowego obserwowano w obiekcie, w którym duże granule ułożono na głębokości 30 cm, a najniższe – na 20 cm. Masa korzeni (świeża i sucha) oraz ich objętość w obiekcie z ułożeniem granul dużych na głębokości 25 cm były większe w porównaniu do obiektu, w którym nawóz umieszczono na głębokości 20 cm. Zaobserwowano także podobny, statystycznie istotny wpływ głębokości aplikacji granul dużych (20 cm, 25 cm lub 30 cm) na świeżą i suchą masę nadziemnej części roślin.

Analiza wariancji nie wykazała statystycznie istotnego wpływu czynnika II (głębokość umieszczenia granul standardowych) na rozwój roślin. Najwyższe wartości badanych cech: powierzchnia, średnica, długość, objętość, gęstość objętościowa korzeni, świeża i sucha masa korzeni oraz świeża masa roślin otrzymano umieszczając granule standardowe na głębokości 2 cm, jednakże najwięcej suchej masy części nadziemnych roślin wytworzyły, gdy nawóz umieszczony był na głębokości 8 cm. Najniższe wartości dla powierzchni, średnicy, długości, świeżej i suchej masy korzeni, objętości otrzymano lokując nawóz na 2 cm. W celu wyodrębnienia najlepszej kombinacji do-



Fot. 2. Rozwój systemu korzeniowego kukurydzy w zależności od głębokości ulokowania nawozu – faza BBCH 17 (M – głębokość ulokowania granul standardowych, S – głębokość ulokowania granul dużych)

Fig. 2. The development of the root system of maize depending on the depth placement of fertilizer in BBCH 17 stage (M – the depth of placing standard granules, S – the depth of placing big granules).

Tabela 2. Wartości średnie badanych cech kukurydzy dla czynnika I (głębokość umieszczenia granul dużych) niezależnie od czynnika II (głębokość umieszczenia granul standardowych poniżej ziarniaka)

Table 2. The mean values of the observed traits for the factor I independently of the factor II for different application depth of big granules.

Obiekt Site	Powierzchnia Surface area [mm ²]	Długość Length [mm]	Średnica Diameter [mm]	Świeża masa Fresh matter [g]	Sucha masa Dry matter [g]	Objętość Volume [cm ³]	Świeża masa Fresh matter [g]	Sucha masa Dry matter [g]	Gęstość objętościowa korzeni RLD Root length density [cm/cm ³]
	korzeń root						część nadziemna aerial part		
	20 cm	134865 a	159200 a	0,87 a	57,1 a	5,0 a	59,1 a	101,4 a	10,6 a
25 cm	142407 a	161370 a	0,92 a	73,8 b	6,7 b	77,3 b	127,4 b	13,6 b	5,5 a
30 cm	143663 a	196385 a	0,81 a	70,3 ab	5,9 ab	73,1 ab	121,1 b	13,0 b	6,7 b
Średnia Mean	140311	172318	0,865	67,1	5,8	69,8	116,6	12,4	5,9

Te same litery oznaczają brak statystycznych różnic na poziomie istotności $\alpha = 0,05$; Different letters in a column mean significant differences at the $\alpha = 0.05$ level

Tabela 3. Wartości średnie badanych cech kukurydzy dla czynnika II (głębokość umieszczenia granul standardowych poniżej ziarniaka).

Table 3. The mean values of the observed traits for the factor II for different application depths of standard granules.

Obiekt Site	Powierzchnia Surface area [mm ²]	Długość Length [mm]	Średnica Diameter [mm]	Świeża masa Fresh matter [g]	Sucha masa Dry matter [g]	Objętość Volume [cm ³]	Świeża masa Fresh matter [g]	Sucha masa Dry matter [g]	Gęstość objętościowa korzeni RLD Root length density [cm/cm ³]
	korzeń root						część nadziemna aerial part		
2 cm	146960 a	176289 a	0,90 a	72,1 a	6,5 a	74,8 a	119,7 a	12,2 a	6,1 a
5 cm	140818 a	173364 a	0,86 a	66,3 a	5,9 a	69,6 a	113,1 a	12,1 a	6,0 a
8 cm	133157 a	167301 a	0,83 a	62,8 a	5,1 a	65,0 a	117,2 a	12,9 a	5,7 a
Średnia Mean	140311	172318	0,87	67,1	5,8	69,8	116,6	12,4	5,9

Te same litery oznaczają brak statystycznych różnic na poziomie istotności $\alpha = 0,05$; Different letters in a column mean significant differences at the $\alpha = 0.05$ level

Tabela 4. Wartości średnie badanych cech kukurydzy

Table 4. Mean values of observed maize characteristics.

Obiekt Site [#]	Powierzchnia Surface area [mm ²]	Długość Length [mm]	Średnica Diameter [mm]	Świeża masa Fresh matter [g]	Sucha masa Dry matter [g]	Objętość Volume [cm ³]	Świeża masa Fresh matter [g]	Sucha masa Dry matter [g]	Gęstość objętościowa korzeni RLD Root length density [cm/cm ³]
	korzeń root						część nadziemna aerial part		
2+20	152890 a	183072 a	0,92 a	65,3 ab	5,9 ab	70,3 ab	107,6 ab	11,3 abc	6,3 abc
5+20	116809 a	144750 a	0,82 a	49,4 a	4,2 a	51,1 a	90,5 a	9,2 c	5,0 a
8+20	134895 a	149777 a	0,85 a	56,7 ab	4,9 ab	55,8 ab	106,1 ab	11,1 ac	5,1 a
2+25	145208 a	157085 a	0,97 a	75,8 ab	7,3 b	77,4 ab	128,5 b	13,3 ab	5,4 ab
5+25	152983 a	168646 a	0,96 a	82,2 b	7,6 b	85,8 b	133,4 b	14,3 ab	5,8 abc
8+25	129030 a	158379 a	0,82 a	63,4 ab	5,2 ab	68,6 ab	120,3 ab	13,2 ab	5,4 ab
2+30	142781 a	188711 a	0,82 a	75,2 ab	6,3 ab	76,8 ab	123,0 b	11,9 abc	6,5 bc
5+30	152661 a	206697 a	0,81 a	67,4 ab	6,0 ab	72,0 ab	115,3 ab	12,7 ab	7,1 c
8+30	135545 a	193747 a	0,81 a	68,2 ab	5,2 ab	70,6 ab	125,0 b	14,4 b	6,6 bc
Średnia Mean	140311	172318	0,87	67,1	5,8	69,8	116,6	12,4	5,9

Te same litery oznaczają brak statystycznych różnic na poziomie istotności $\alpha = 0,05$; Different letters in a column mean significant differences at the $\alpha = 0.05$ level[#] 2, 5, 8 głębokość aplikacji granul standardowych od ziarniaka; 20, 25, 30 głębokość aplikacji granul dużych od powierzchni gleby
2, 5, 8, represent the depth [cm] of standard granules from the caryopsis; 20, 25, 30 represent the depth [cm] of big granules from the soil surface

świadczalnej przeprowadzono analizę porównań wielokrotnych (tab. 4).

Statystyczne istotne różnice pomiędzy porównywanymi obiektami stwierdzono dla następujących parametrów: objętość, świeża i sucha masa korzeni, gęstość objętościowa korzeni oraz świeża i sucha masa nadziemnych części roślin. W przypadku powierzchni, długości oraz średnicy różnice nie były istotne.

Objętość systemu korzeniowego wynosiła od 51,1 cm³ do 85,8 cm³. Statystycznie istotne różnice stwierdzono pomiędzy obiektami 5+20 cm a 5+25 cm. Zauważono, że

w obiektach, gdzie granule duże były lokowane na głębokości 20 cm, niezależnie od głębokości umieszczania granul standardowych, korzenie zajmowały najmniejszą objętość. Wytworzeniu większej objętości sprzyjała aplikacja granul standardowych na głębokość 2 lub 5 cm i granul dużych na głębokość 25 lub 30 cm. Świeża masa korzeni wahała się w przedziale od 49,4 g do 82,2 g, a statystycznie istotne różnice stwierdzono dla kombinacji: 5+20 cm i 5+25 cm. Sucha masa korzeni wynosiła od 4,2 g do 7,6 g, a statystycznie istotne różnice stwierdzono pomiędzy obiektami 5+20 cm a 2+25 cm i 5+25 cm. Najwyższy

przeciętny plon świeżej masy części nadziemnej roślin odnotowano w obiektach: 5+25 cm, 2+25 cm i 8+30 cm i wynosił on odpowiednio: 133,4 g, 128,5 g i 125,0 g. Najniższe wartości uzyskano w kombinacjach: 5+20 cm (90,5 g), 8+20 cm (106,1 g) i 2+20 cm (107,6 g). Analiza statystyczna wykazała istotne różnice pomiędzy obiektami 5+20 cm a 2+30 cm, 2+25 cm, 5+25 cm i 8+30 cm. Największą suchą masę nadziemną uzyskano w kombinacjach 5+25 cm (14,3 g) i 8+30 cm (14,4 g), natomiast najniższe wartości suchej masy oznaczono w obiekcie 5+20 cm (9,2 g). Statystycznie istotne różnice wystąpiły pomiędzy wariantami 5+20 cm a 2+25, 5+25, 8+25, 5+30, 8+30 cm oraz 8+20 cm i 8+30 cm. Średnia gęstość objętościowa korzeni ze wszystkich badanych obiektów wyniosła 5,9 cm/cm³. Największą gęstością objętościową charakteryzowały się obiekty 5+30 cm (7,1 cm/cm³) i 8+30 cm (6,6 cm/cm³), a najmniejszą obiekt 5+20 cm (5,0 cm/cm³) oraz obiekt 8+20 cm (5,1 cm/cm³). Statystycznie istotne różnice wystąpiły pomiędzy kombinacjami 5+20, 8+20 a 2+30, 5+30, 8+30 oraz 5+30 a 2+25 i 8+25.

Powierzchnia systemu korzeniowego wahała się od 116809 mm² do 152983 mm². Analiza statystyczna nie wykazała istotnego zróżnicowania tej cechy pomiędzy obiektami nawozowymi. Największą powierzchnię korzeni wytworzyły rośliny w kombinacjach: 5+25 cm, 5+30 cm i 2+20 cm, a najmniejszą wartość zmierzono w kombinacjach 5+20 cm i 8+25 cm. Długość korzeni wynosiła od 144750 mm do 206697 mm i nie różniła się istotnie pomiędzy kombinacjami nawozowymi. Najdłuższy system korzeniowy wytworzyły rośliny w obiektach 8+30 cm i 5+30 cm, a najkrótszy w obiektach 5+20 cm i 8+20 cm. Przeciętna średnica korzenia wynosiła od 0,81 do 0,97 mm. Największą średnicę stwierdzono w obiektach 2+25 cm, 5+25 cm i 2+20 cm, a najmniejszą w kombinacjach 5+30 cm i 8+30 cm, jednak różnice te nie były statystycznie istotne. Biorąc pod uwagę wszystkie badane parametry, należy stwierdzić, że sposób aplikacji nawozu w obiektach 5+25 cm i 2+25 cm miał najbardziej korzystny wpływ na rozwój systemu korzeniowego i akumulację nadziemnej masy kukurydzy. Stosunkowo najslabsze efekty uzyskano w kombinacjach 5+20 cm i 2+20 cm.

DYSKUSJA

W literaturze brakuje badań, które byłyby ściśle związane z wpływem głębokości ulokowania nawozu w glebie na rozwój korzeni roślin. Badania dotyczące rozwoju korzeni koncentrują się głównie na wpływie zróżnicowanych dawek N, P, K (Eghball i in., 1993) czy różnych uproszczonych technologii uprawy – od konwencjonalnej do zerowej (Stanisławska-Głubiak, Korzeniowska, 2010). W praktyce standardem jest aplikacja startowej dawki nawozów na głębokości 5 cm poniżej ziarniaka kukurydzy i 5 cm w bok od rządka (Kruczek, 2004, 2005; Kruczek, Sulewska, 2005; Michalski, Kowalik, 2007). W badaniach wła-

snych najlepsze efekty uzyskano w obiekcie, gdzie dawka startowa była ulokowana na głębokości 5 lub 2 cm poniżej ziarniaka kukurydzy.

Wyniki prowadzonego przez nas doświadczenia nie potwierdziły statystycznie istotnego zróżnicowania średniej średnicy korzenia między testowanymi kombinacjami. Badania Pallant i in. (1993) dowodzą, że 56% całkowitej długości korzeni kukurydzy uprawianej w polu stanowią korzenie cieńsze niż 0,175 mm, natomiast według Hacketa (1968) korzenie cieńsze niż 0,5 mm mogą stanowić nawet 80% całkowitej długości korzeni jęczmienia. Niestety, wykorzystane oprogramowanie analityczne nie pozwoliło na wydzielenie procentowego udziału korzeni w poszczególnych zakresach średnicy, co stanowi ograniczenie tej metodyki i uniemożliwia odniesienie się do wyników innych badaczy. Zhang i in. (2012) w badaniach nad wpływem deficytu fosforu na dynamikę wzrostu korzeni stosując skrajne dawki P, tj. 0 i 100 kg P₂O₅·ha⁻¹, wykazali, że deficyt fosforu objawia się znaczącym wzrostem liczby korzeni o średnicy mniejszej niż 0,6 mm. W badaniach własnych przeciętne wartości średnicy korzeni wahały się od 0,81 do 0,97 mm, co w świetle badań Zhang i in. (2012) sugeruje, że w prowadzonym doświadczeniu zaopatrzenie roślin w fosfor było na optymalnym poziomie.

Wielu autorów podnosi również problem wpływu rzędowego nawożenia na koncentrację składników mineralnych w kukurydzy. Rzędowy wysiew nawozu istotnie zwiększa w roślinach zawartość fosforu i azotu oraz zmniejsza zawartość potasu i wapnia, w porównaniu do wysiewu rzutowego (Kruczek, Sulewska, 2005). Uzyskany wynik potwierdzają Dubas i Duhr (1983), którzy stwierdzili statystycznie istotnie większą zawartość fosforu (o 0,43 pkt.%) w suchej masie młodych roślin kukurydzy w wyniku nawożenia rzędowego, w stosunku do nawożenia rzutowego.

Cai i in. (2014) w eksperymencie polowym porównywali rozwój korzeni kukurydzy w systemie orki konwencjonalnej i głębokiej (na dwóch poziomach – 30 cm oraz 50 cm), stosując na wszystkich obiektach 90 kg·ha⁻¹ N, 90 kg·ha⁻¹ P₂O₅ (w formie fosforanu amonu) i 90 kg·ha⁻¹ K₂O w postaci KCl przedsiewnie oraz 135 kg N·ha⁻¹ w formie mocznika pogłównie. W obiektach z konwencjonalną orką zaobserwowano statystycznie mniejsze niż w obiektach z orką głęboką wartości następujących parametrów: długość korzeni (śr. 11495,8 cm), powierzchnia korzeni (śr. 1641,0 cm²) i sucha masa korzeni (śr. 8,37 g).

W innych badaniach polowych nad wpływem różnych technologii uprawy kukurydzy na system korzeniowy Bian i in. (2016) dowiedli, że największą liczbę korzeni wytwarzały rośliny w obiekcie z orką i okopywaniem, a nieco mniejszą w obiekcie z orką bez okopywania. Najmniejszą liczbę korzeni zaobserwowali w obiektach z siewem bezpośrednim w nieuprawioną glebę. Badacze określili również gęstość objętościową korzeni oraz średnicę korzeni. Eksperyment wykazał, że w uproszczonym

systemie uprawy z siewem bezpośrednim zarówno gęstość objętościowa korzeni, stosunek masy pędu do korzeni, jak i średnica korzeni były istotnie mniejsze niż w obiektach z orką (Bian i in., 2016).

Wyniki Bian i in. (2016) są zbieżne z obserwacjami Chassot i in. (2001), którzy w badaniach porównawczych różnych systemów uprawy również otrzymali znacząco niższe wartości gęstości objętościowej korzeni w systemie uproszczonym. Wyniki te podważają jednak rezultaty doświadczenia Chena i Weila (2011), którzy na glebie pylasto-gliniastej (*fine-loamy*) zaobserwowali, że uproszczenia uprawowe na glebie zagęszczanej (poprzedzone poplonem) pozytywnie wpływają na parametry glebowe, powodując głębsze ukorzenianie roślin.

W badaniach polowych Jing i in. (2012) nad wpływem zlokalizowanego nawożenia zarówno azotowego (azot w formie saletry, jonu amonowego oraz mocznika), jak i fosforowego ($60 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ w postaci mocznika + $120 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{ha}^{-1}$) na rozwój korzeni kukurydzy stosowano nawóz na głębokości 10 cm i w odległości 10 cm od ziarna, a pomiaru suchej masy roślin dokonano w 29 DS (dniu od siewu). Plon pędu nadziemnego wynosił średnio 14,5 g/roślinę, zaś sucha masa korzeni wynosiła 0,98 g/roślinę. Zmierzona w 49 DS gęstość objętościowa korzeni z głębokości 30–45 cm wyniosła mniej niż $1,5 \text{ cm/cm}^3$, a sucha masa pędu wyniosła średnio 14 g. Badania te ujawniły również, że większe zagęszczenie korzeni kukurydzy obserwowane było w obiektach nawożonych w sposób zlokalizowany fosforem i azotem w formie amonowej niż w obiektach z nawożeniem azotowym w formie mocznika (Jing i in., 2012). W badaniach własnych uzyskano zdecydowanie wyższe wartości RLD – średnio dla obiektów gęstość korzeni wynosiła $5,9 \text{ cm/cm}^3$. Dyskusyjnie wydaje się stwierdzenie, że różnice te mogą wynikać wyłącznie z różnic (błędów) metodycznych w ekstrakcji korzeni z pola (w badaniach w rizoboksach niemal 100% korzeni podlega pomiarom). W dalszym toku badań należałoby ocenić zależność między wynikami RLD uzyskanymi w kontrolowanych warunkach w rizoboksach a wynikami uzyskiwanymi w doświadczeniach polowych (*research gap*). Znacznie niższe wartości tego parametru uzyskała również Peng i in. (2012) w badaniach nad dynamiką i przestrzennym zróżnicowaniem gęstości korzeni w tradycyjnym systemie uprawy (*rotary tillage*) na glebie wapiennej utworzonej z mady gliniastej. W warstwie 30–40 cm w fazie 45–50 DS wynosiła ona $0,08\text{--}0,05 \text{ cm/cm}^3$. Autorzy sami zastrzegli jednak, że uzyskane przez nich wartości mogą być zaniżone, a faktyczna gęstość objętościowa korzeni prawdopodobnie była wyższa.

W dwuletnim eksperymencie polowym nad wpływem międzyplonów na parametry wzrostu kukurydzy gęstość objętościowa korzeni kukurydzy bez wsiewek mierzona w fazie 50 DS w odległości 0–10 cm od wysiewu wynosiła 97 cm/100 cm^3 oraz 113 cm/100 cm^3 odpowiednio w 2007 i w 2008 r. (opracowanie własne na podstawie Gao i in., 2010). Są to wartości zdecydowanie niższe od uzys-

skanych w badaniach własnych, gdyż np. w obiekcie 8+25 cm średnia gęstość objętościowa korzeni wynosiła $7,1 \text{ cm/cm}^3$ (710 cm/100 cm^3). Powodem tak dużej rozbieżności może być niezupełna ekstrakcja systemu korzeniowego z gleby, która może skutkować większym błędem w porównaniu do doświadczeń prowadzonych w kontrolowanych warunkach w rizoboksach.

PODSUMOWANIE

Uzyskane przez nas wyniki badań dla roślin zbieranych w fazie 9–10 liści nie są jednoznaczne. Niemniej jednak można zaobserwować rysujące się tendencje na korzyść stosowania kombinacji 2+25 cm oraz 5+25 cm. Dla wymienionych kombinacji zaobserwowano najwyższe wartości następujących parametrów korzeni: powierzchni, średnicy, świeżej masy, suchej masy oraz objętości. Natomiast najniższe wartości średnie dla powierzchni, długości, świeżej i suchej masy, objętości korzeni oraz świeżej i suchej masy roślin odnotowano w kombinacji 5+20 cm. Na podstawie przeprowadzonego eksperymentu zasadne wydaje się lokowanie granul dużych na głębokości 25 cm, a granul standardowych na głębokości 2 lub 5 cm poniżej ziarniaka.

PIŚMIENNICTWO

- Bian D., Jia G., Cai L., Ma Z., Eneji A.E., Cui Y., 2016. Effects of tillage practices on root characteristics and root lodging resistance of maize. *Field Crops Research*, 185: 89-96.
- Cai H., Mab W., Zhang X., Ping J., Yan X., Liu J., Yuan J., Wang L., Ren J., 2014. Effect of subsoil tillage depth on nutrient accumulation, root distribution, and grain yield in spring maize. *The Crop Journal*, 2(5): 297-307.
- Castronguay Y. S., Laberge S., Brummer E. C., Volenec J. J., 2006. Alfalfa Winter Hardiness: A Research Retrospective and Integrated Perspective. *Advances in Agronomy*, 90: 203-265.
- Chassot A., Stamp P., Richner W., 2001. Root distribution and morphology of maize seedlings as affected by tillage and fertilizer placement. *Plant and Soil*, 231: 123-135.
- Chen, G., Weil, R.R., 2011. Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops. *Soil Tillage Research*, 117: 17-27.
- Dubas A., Duhr E., 1983. Wpływ sposobu nawożenia fosforem na plonowanie kukurydzy. *Pamiętnik Puławski*, 81: 131-139.
- Eghball B., Settini J.A., Maranville J.W., Parkhurst A.N., 1993. Fractal analysis for morphological description of corn roots under nitrogen stress. *Agronomy Journal*, 85: 287-289.
- Fageria N.K., 2013. The role of plant roots in crop production, ss. 1-44. Fageria, N. K., The role of plant root in crop production. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, USA.
- Gao Y., Duan A., Qiu X., Liu D., Sun J., Zhang J., Wang H., 2010. Distribution of roots and root length density in a maize/soybean strip intercropping system. *Agricultural Water Management*, 98: 199-212.
- Grzesiak M.T., 2009. Impact of soil compaction on root architecture, leaf water status, gas exchange and growth of maize and triticale seedlings. *Plant Root*, 3: 10-16.

- GUS Główny Urząd Statystyczny, 2015. Mały rocznik statystyczny Polski. Warszawa.
- Hacket C., 1968.** A study of the root system of barley. I. Effects of nutrition in two varieties. *New Phytologist*, 67: 287-298. http://www.inhort.pl/files/struktura_io/prac_ryzosfery/Oferaty_pracowni_ryzosfery/oferta_prac_rizo3.pdf (dostęp 01.02.2016 r.)
- Jadczyszyn J., 2015.** Gospodarowanie na terenach ukształtowanych. ss. 60-70. W: *Dobre praktyki rolnicze na obszarach szczególnie narażonych (OSN) na azotany pochodzenia rolniczego*; Jadczyszyn T., Brwinów.
- Jing J.Y., Zhang F.S., Rengel Z., Shen J.B., 2012.** Localized fertilization with P plus N elicits an ammonium-dependent enhancement of maize root growth and nutrient uptake. *Field Crop Research*, 133: 176-185.
- Kruczek A., 2004.** Gromadzenie suchej masy w początkowym okresie wzrostu jako wyznacznik reakcji mieszańców kukurydzy na sposób nawożenia i terminu siewu. *Acta Agrophysica*, 4(2): 361-372.
- Kruczek A., 2005** Wpływ nawożenia rzędowego różnymi rodzajami nawozów na plonowanie kukurydzy. *Acta Scientiarum Polonorum, Agricultura*, 4(2): 37-46.
- Kruczek A., Sulewska H., 2005.** Wpływ sposobu nawożenia, terminu siewu i odmian na gromadzenie składników mineralnych przez kukurydzę w początkowym okresie rozwoju. *Acta Agrophysica*, 5(3): 683-694.
- Michalski, T., Kowalik I., 2007.** Nawożenie startowe jako metoda poprawy efektywności nawożenia i obniżki kosztów produkcji kukurydzy. *Inżynieria Rolnicza*, 6(94): 167-174.
- Pallant E., Holmgren R.A., Schuler G.E., McCracken K.L., Drbal B., 1993.** Using a fine root extraction device to quantify small diameter corn roots (50.025 mm) in field soils. *Plant and Soil*, 153: 273-279.
- Paluszek, J., 2011.** Kryteria oceny jakości fizycznej gleb uprawnych Polski (Tom 2). Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN w Lublinie.
- Peng Y., Yu P., Zhang Y., Sun G., Ning P., Li X., Li C., 2012.** Temporal and spatial dynamics in root length density of field-grown maize and NPK in the soil profile. *Field Crops Research*, 131: 9-16.
- Stanisławska-Głubiak E., Korzeniowska J., 2010.** Skuteczność zlokalizowanego nawożenia kukurydzy i grochu w tradycyjnym i zerowym systemie uprawy roli. *Fragmenta Agronomica*, 27(1):160-169.
- Zhang Y., Yu P., Peng Y. F., Li X. X., Chen F. J., Li C. J., 2012.** Fine root patterning and balanced inorganic phosphorus distribution in the soil indicate distinctive adaptation of maize plants to phosphorus deficiency. *Pedosphere*, 22(6): 870-877.

P. Ochal, T. Jadczyszyn, B. Jurga

MAIZE ROOT DEVELOPMENT DEPENDING
ON THE DEPTH OF FERTILIZER APPLICATION
TO THE SOIL

Summary

Reduced technologies of maize production are becoming more and more popular due to lowering of production costs and positive effects on soil characteristics. As a stage of creating new simplified technology of maize production testing of granular fertilizer UreaPhos(Mikro) in two sizes (standard granules and big granules) had to be performed. Root-box experiment was conducted in 2014 and 2015 to evaluate the effects of placing fertilizer in the following depths: standard granules placed on 2, 5 and 8 cm under maize caryopsis and big granules placed on 20, 25 and 30 cm depth. Each sampled seedling was cut in 43-day into a shoot and root system. The samples of roots were manually washed using a sieve. Morphological traits of roots, such as root length, root surface area, root diameter, were determined with a digital image root analyzer (Delta T Scan, Delta T Co., England). Fresh matter and dry matter of shoot and root were measured. The experiment revealed that the best parameters of root traits were obtained in root-box 5+25 cm and 2+25 cm. Therefore, recommended depth of placing new fertilizer UreaPhos(Mikro) in the soil is 25 cm for big granules and 2 or 5 cm for standard granules.

key words: maize, root, localized fertilization, fertilizer UreaPhos(Mikro), Delta – T Scan, root length density