



Katedra Biotechnologii, Mikrobiologii i Żywnienia Człowieka,
Wydział Nauk o Żywności i Biotechnologii, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie,
ul. Skromna 8, 20-704 Lublin, Polska

*e-mail: anna.krzepilko@up.lublin.pl

KATARZYNA MAGDALENA MATYSZCZUK , ANNA KRZEPIŁKO *

Nanocząstki tlenku cynku – przykłady oddziaływań na wzrost i rozwój roślin

Zinc oxide nanoparticles – affect the growth and development of plants

Abstrakt. Nanomateriały zawierające tlenek cynku znajdują coraz szersze zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu oraz w rolnictwie. Dane literaturowe potwierdzają, że nanocząstki tlenku cynku mogą korzystnie wpływać na kiełkowanie, wzrost roślin, przebieg fotosyntezy i wybrane procesy metaboliczne u różnych gatunków roślin. Użycie nanocząstek tlenku cynku może przyczynić się do poprawy plonowania roślin, jednak konieczne jest dopasowanie dawki tego nanonawozu do fazy rozwoju i gatunku rośliny. Nanocząstki tlenku cynku (ang. zinc oxide nanoparticles, ZnONPs) uwalniają jony cynku, w ten sposób przyczyniają się do lepszego odżywienia roślin w ten składnik i mogą wpływać na zmniejszenie zanieczyszczenia gleby spowodowanego nadmiernym stosowaniem nawozów. Zastosowanie nanocząstek tlenku cynku może też wiązać się z ryzykiem toksykologicznym dla roślin. Toksyczność wywołana przez ZnONPs może przejawiać się zmniejszeniem zdolności kiełkowania, hamowaniem wzrostu, zaburzeniami podziału komórek, nieprawidłową ekspresją genów, objawami stresu oksydacyjnego. Nanotoksyczność tlenku cynku zależy zarówno od wielkości nanocząstek, dawki, jak i gatunku rośliny.

Słowa kluczowe: cynk, nanocząstki tlenku cynku, rośliny

CYNK JAKO WAŻNY SKŁADNIK MINERALNY DLA ROŚLIN

Cynk zaliczany jest do składników pokarmowych zapewniających prawidłowy przebieg procesów życiowych w roślinie. Zapotrzebowanie roślin na cynk zależy od gatunku rośliny, rodzaju gleby, nawożenia i warunków klimatycznych. Optymalna podaż cynku

Cytowanie: Matyszczuk K.M, Krzepiło A., 2024. Nanocząstki tlenku cynku – przykłady oddziaływań na wzrost i rozwój roślin. *Agron. Sci.*, online first, 1–19. <https://doi.org/10.24326/as.2024.5199>

sprzyja rozwojowi i plonowaniu roślin uprawnych. Niedobór Zn ogranicza produkcję dwóch podstawowych zbóż – ryżu i kukurydzy. Do roślin wrażliwych na niedobór tego pierwiastka należą też m.in.: bawełna, len, chmiel, fasola, sorgo, brzoskwinia, jabłoń [Martens i Westerman 1991].

Zawartość cynku w glebie jest odzwierciedleniem naturalnego poziomu tego pierwiastka w skałach macierzystych i procesów związanych z działalnością człowieka. Ilość cynku w skale macierzystej i przebieg procesu glebotwórczego warunkuje naturalną zawartość cynku w glebie [Siebielec i in. 2018]. Źródłem cynku pochodzenia antropogenicznego w glebach może być m.in. emisja z przemysłu górniczego i hutniczego, elektrowni, składowania odpadów przemysłowych oraz działań z zakresu agrotechniki. Niedobory tego składnika uzupełnia się przez nawożenie siarczanem cynku i tlenkiem cynku, rzadziej stosowane są octan cynku i chelaty cynku. Cynk dostarczany jest także z nawozami organicznymi, a także z nawozami fosforowymi [Broadley i in. 2007, Korzeniowska 2009]. Najważniejszym czynnikiem ograniczającym dostępność tego mikroelementu dla roślin jest zasadowy odczyn gleby, który zmniejsza jego rozpuszczalność. Rozpuszczalny cynk obecny w roztworze glebowym jest pobierany przez korzenie roślin, może także być absorbowany przez liście [Alloway 2009]. Dla większości roślin typowe stężenie cynku w liściach, wymagane do odpowiedniego wzrostu, wynosi ok. 15–20 mg Zn·kg⁻¹ suchej masy [Broadley i in. 2007].

O ważnej roli cynku w procesach fizjologicznych roślin świadczy jego udział w podstawowych procesach biochemicznych, takich jak przemiany węglowodanów, fotosynteza, biosynteza białek, oddychanie [Cabot i in. 2019]. Stanowi ważny składnik wielu enzymów: anhidrazy węglanowej, dysmutazy ponadtlenkowej, polimerazy RNA. Enzym anhidraza węglanowa bierze udział w tworzeniu jonu węglanowego, dzięki czemu wzrasta jego stężenie i następuje szybsze wiązanie przez rybulozo-1,5-bisfosforan w cyklu Calvina. Dysmutaza ponadtlenkowa przeprowadza reakcję usuwania anionorodnika ponadtlenkowego i w ten sposób chroni komórki przed wolnymi rodnikami [Cakmak 2000]. Cynk zapewnia stabilność i prawidłowe funkcje chromatyny, uczestniczy w metabolizmie DNA/RNA, warunkuje aktywność polimerazy RNA [Cabot i in. 2019]. Pełni kluczowe funkcje strukturalne w domenach białek, które oddziałują z innymi cząsteczkami, m.in. pośredniczy w wiązaniu czynników transkrypcyjnych do DNA oraz w interakcjach białko-białko [Ramesh i in. 2014]. Wiele czynników transkrypcyjnych uczestniczących w ekspresji genów zawiera tzw. palce cynkowe. Cynk reguluje też funkcjonowanie rybosomów, wpływa na procesy ich powstawania i stabilizuje ich struktury białkowe. Cynk wpływa na wytwarzanie substancji wzrostowych – auksyn, gdyż jest konieczny do biosyntezy tryptofanu, prekursora kwasu indolilo-3-octowego. Niedobór cynku obniża poziom auksyn w roślinach, co poważnie zaburza podziały komórek, hamuje wzrost i rozwój roślin. Brak cynku w żywieniu roślin wpływa też na inne hormony wzrostu, zaburza poziom cytokinin, zakłóca równowagę hormonalną pomiędzy auksynami i cytokininami oraz cytokininami i kwasem abscysynowym [Puzina 2004].

Cynk uczestniczy w metabolizmie azotu, przez co wpływa na poprawę efektywności nawożenia azotowego, a także oddziałuje na przemiany wapnia i fosforu [Helfenstein i in. 2015]. Uczestniczy też w przemianach organicznych związków azotu, co wpływa na aktywność fosfatazy rozkładającej fosforan pirydoksalu – koenzym niezbędny w procesach transaminacji i dekarbosylacji aminokwasów [Cakmak 2000].

Fizjologiczną rolą cynku jest utrzymanie integralności i funkcji błon komórkowych. Aktywność enzymów wakuolarnych błon plazmatycznych tzw. pomp protonowych regulowana jest przez cynk i umożliwia roślinom transport substancji przez tonoplast [Kabała

i Janicka-Russak 2011]. Niedobór Zn powoduje zaburzenie wielu funkcji fizjologicznych komórek roślin i prowadzi do ograniczenia wzrostu, obniżenia ilości i jakości plonów [Hassan i in. 2020]. Właściwe nawożenie cynkiem poprawia ogólną kondycję roślin oraz zwiększa ich odporność na okresowe niedobory wody i niską temperaturę. W uprawach: pszenicy, słonecznika, pomidora i czerwonej kapusty zwiększa tolerancję na suszę [Hassan i in. 2020]. Przyspiesza regenerację roślin po wystąpieniu czynników stresowych oraz zwiększa odporność na fitopatogeny [Helfenstein i in. 2015]. Wysokie stężenia cynku mogą powodować toksyczność u roślin. Ogólnymi objawami są karłowatość pędów, związanie się młodych liści, zamieranie wierzchołków liści i chloroza [Kaur i Garg 2021].

NANOCZĄSTKI TLENKU CYNKU – OTRZYMYWANIE, WŁAŚCIWOŚCI I ZASTOSOWANIE

Nanocząstki tlenku cynku znalazły różnorodne zastosowanie, głównie w przemyśle gumowym, elektronicznym, farbiarskim, farmaceutycznym, spożywczym, a w ostatnich latach coraz częściej w rolnictwie. Tak szerokie wykorzystanie nanotlenku cynku związane jest z właściwościami tego materiału. Jest to półprzewodnik, a ta charakterystyczna właściwość odgrywa kluczową rolę w konstrukcji ogniw słonecznych, urządzeń emitujących promieniowanie ultrafioletowe, warystorach, czujnikach gazów oraz przetwornikach [Mirzaei i Darroudi 2017]. Nanocząstki tlenku cynku (ang. zinc oxide nanoparticles, ZnONPs) mają wysoką przewodność cieplną i jednocześnie niewielką przewodność elektryczną, co wpływa na właściwości gum i kauczuków, do których jest dodawany. Pochłanianie promieniowania UV, co jest pożądaną cechą filtrów przeciwsłonecznych i farb. Z uwagi na właściwości bakteriobójcze i dezynfekujące jest powszechnie stosowany w produktach higieny osobistej, produkcji opakowań, tkanin, jako składnik kremów i maści [Taunk i in. 2015].

Nanocząstki tlenku cynku są składnikiem nawozów dolistnych i doglebowych, przyspieszających wzrost i rozwój roślin. Ze względu na właściwości przeciwdrobnoustrojowe ZnONPs stosowany jest w środkach ochrony roślin. W testach *in vitro* nanocząstki tlenku cynku (EC_{50} od 235 do 848 $mg \cdot dm^{-3}$) skutecznie hamowały rozwój grzybowych patogenów roślin [Rajpud i in. 2021]. Tlenek cynku w skali nano wykazuje silne właściwości antybakteryjne i jest stosowany do produkcji opakowań żywności.

Najpopularniejszym sposobem otrzymywania ZnONPs jest metoda strącania, w której zwykle stosuje się dwa odczynniki: wysoko oczyszczone sole cynku (octan cynku, siarczan cynku, azotan cynku) oraz roztwór środka wytrącającego (najczęściej wodorotlenek sodu lub wodorotlenek amonu) [Jiang i in. 2018]. Można również przeprowadzić syntezę tych nanocząstek metodami fizycznymi, np. przez pirolizę natryskową, tworzenie mikroemulsji lub rozkład termiczny [Taunk i in. 2015]. W zależności od sposobu syntezy, uzyskuje się nanocząstki o różnej wielkości, o specyficznych właściwościach fizycznych i chemicznych, pomimo tego samego składu chemicznego. Monodispersyjne cząstki ZnONPs mają zróżnicowane kształty: sferyczne, elipsoidalne, igłowe, prętowe [Petu i in. 2010]. Rozwój zielonej chemii, przyjaznej dla środowiska, przyczynił się także do opracowania tanich i ekologicznych metod otrzymywania nanocząstek tlenku cynku [Akbar i in. 2020]. Zielona synteza polega na redukcji soli cynku przez ekstrakty roślinne zawierające takie substancje o właściwościach redukujących jak cukry, związki polifenolowe, aminokwasy lub wykorzystuje jako czynnik redukujący procesy enzymatyczne zachodzące w komórkach bakterii i drożdży [Elumalai i Velmurugan 2015].

INTERAKCJE NANOCZĄSTEK TLENKU CYNKU Z KOMÓRKAMI ROŚLIN

Oddziaływanie nanocząstek na organizmy roślinne jest procesem wielokierunkowym. Jassby i in. [2018] opisują interakcje roślina–ZnONPs jako proces zachodzący w trzech etapach: adsorpcja i transformacja nanocząstek (NP) na powierzchni rośliny (np. na liściu, korzeniu lub łodydze), następnie przenikanie NP i transport i transformacja NP w obrębie roślin.

Literatura przedmiotu dostarcza przykładów zarówno inhibicji, jak i stymulacji procesów fizjologicznych u roślin przez nanocząstki tlenku cynku. Mechanizmy oddziaływania nanocząstek tlenku cynku można wyjaśnić na poziomie komórkowym poprzez bezpośrednie fizykochemiczne reakcje ze składnikami komórek, tworzenie wolnych rodników i uwalnianie jonów [Canaparo i in. 2020, Zhu i in. 2020, Avellan i in. 2021].

Pierwszy bezpośredni kontakt nanocząstek z rośliną polega na oddziaływaniach fizykochemicznych z powierzchnią rośliny. Częsteczki wchodzące w skład tkanek okrywających adsorbują nanocząstki i tworzą z nimi słabe wiązania chemiczne. Uczestniczą w tym procesie grupy funkcyjne cząsteczek budujących ściany komórek roślinnych, głównie grupy karboksylowe, hydroksylowe, ale także amidowe, tiolowe i aromatyczne. Nanocząstki tlenku cynku mogą być pobierane przez różne części rośliny, ale liście i korzenie są głównymi organami, przez które nanocząstki wnikają do rośliny [Avellan i in. 2021]. Kontakt nanocząstek z korzeniami roślin powoduje, że gromadzą się one w ścianie komórkowej. Właściwości nanocząstek, takie jak wielkość, kształt i ich powierzchnia wpływają na oddziaływanie ze ścianami komórkowymi. Struktura ściany komórkowej i jej grubość (5 do 20 nm) ograniczają wnikanie nanocząstek i ich kontakt z błoną komórkową. Ściany komórkowe funkcjonują jak naturalne sita, mają pory o rozmiarach 3–8 nm [Carpita i Gibeau 1993], czyli znacznie mniejsze niż wiele nanocząstek. Jednak nanocząstki mogą indukować powstawanie nowych porów, które pozwalają im przedostać się do wnętrza komórek roślinnych [Navarro i in. 2008]. Badania nad toksycznością ZnONPs potwierdzają, że korzenie pobierają nanocząstki. Wykazano, że ZnONPs o średnicy 8 nm może wnikać do cytoplazmy komórek korzeni kapusty rzepek i gorczyca sarepskiej, co spowodowało uwolnienie jonów cynku, a następnie zwiększenie zawartości Zn^{2+} w organach roślin [Molnár i in. 2020]. W komórkach korzeni życicy ZnONPs o wielkości 19 nm ulegały adsorpcji na powierzchni korzeni, zwiększały przepuszczalność ściany komórkowej i przez plazmodesmy przechodziły do cytoplazmy komórek epidermy i gromadziły się w okolicach wakuoli, jądra i mitochondriów [Lin i Xing 2007]. Nanocząstki tlenku cynku o wielkości 20 nm \pm 5 nm przylegały do powierzchni epiblemy korzenia i stopniowo przenikały do głębiej położonych tkanek. Przy użyciu technik mikroskopowych obserwowano nanocząstki tlenku cynku (<50 nm) w przestrzeniach międzykomórkowych, w ścianach komórkowych i cytoplazmie komórek korzeni [Chen i in. 2015]. W strefie ryzosfery nanocząstki mogą też reagować ze związkami humusowymi i wydzielanymi przez korzenie substancjami organicznymi i tworzyć rozpuszczalne sole, które są łatwiej wchłaniane przez rośliny [Bian i in. 2011.]

Proces pobierania nanocząstek z powierzchni liści zachodzi głównie przez aparaty szparkowe. Potwierdzono to w doświadczeniu z nanocząstkami tlenku cynku (30 nm) znakowanymi barwnikiem fluorescencyjnym. Nanocząstki wnikają do liścia przez aparaty szparkowe, gromadzą się najpierw w apoplastach, a następnie są transportowane do komórek mezofilu. Dodatkowo potwierdzono, że w apoplastach z ZnONPs uwalniane są jony cynku, a następnie są one absorbowane przez komórki mezofilu [Zhu i in. 2020].

Nanocząstki po przeniknięciu do wnętrza komórek mogą w różny sposób wpływać na procesy komórkowe, stymulować lub hamować procesy metaboliczne, co w konsekwencji przekłada się na wzrost i rozwój całych roślin. Obecne na powierzchni komórek związki chemiczne zawierające grupy funkcyjne karboksylowe i fosforanowe nadają jej ładunek ujemny, co sprzyja akumulacji nanocząstek ZnO na powierzchni komórki i ich adsorpcji [Canaparo i in. 2020]. Jeden z możliwych mechanizmów działania nanocząstek tlenku cynku na komórki roślin to generowanie wolnych rodników. Procesy prowadzące do powstania wolnych rodników zachodzą na powierzchni nanocząstek ZnO na skutek oddziaływania z utleniaczami obecnymi w środowisku reakcji. Ponadto właściwości elektrochemiczne ZnONPs sprzyjają tworzeniu grup reaktywnych na ich powierzchni. W tych reaktywnych miejscach donor lub akceptor elektronów oddziałują z tlenem cząsteczkowym, tworząc anionorodnik ponadtlenkowy (O_2^-), który z kolei może generować dodatkowe reaktywne formy tlenu [Canaparo i in. 2020, Rajput i in. 2021]. Nanocząstki tlenku cynku mogą generować reaktywne formy tlenu i powodować w komórkach stres oksydacyjny. W komórkach roślin w odpowiedzi na ZnONPs obserwowano zmiany charakterystyczne dla stresu oksydacyjnego jak: zmiany aktywności enzymów antyoksydacyjnych, stężenia antyoksydantów i uszkodzenia składników komórki. W roślinach jadaloszywno baziowatego stwierdzono zwiększoną aktywność enzymów zaangażowanych w ochronę komórek przed stresem oksydacyjnym, takich jak katalazy i peroksydazy [Hernandez-Viezas i in. 2011]. Podobne objawy stresu oksydacyjnego stwierdzono w komórkach rośliny wodnej spirodela z podrodziny rzęsowych, gdzie ZnONPs o stężeniu $0,01 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, wywołały uszkodzenia oksydacyjne i peroksydację błon komórkowych oraz zmiany aktywności dysmutazy ponadtlenkowej [Thwala i in. 2013]. Opryskiwanie sadzonek ogórka dolistnie roztworem ZnONPs ($50 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$) nie wpłynęło istotnie na poziom H_2O_2 i peroksydację lipidów mierzoną zawartością aldehydu dimalonowego. Jednak wyższa dawka ZnONPs ($100 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$) zwiększyła poziom aktywności enzymów dysmutazy ponadtlenkowej i katalazy w liściach, chociaż nie wpływała na zawartość H_2O_2 i aldehydu dimalonowego. Według autorów nanocząstki tlenku cynku wspierają ochronę antyoksydacyjną komórek [Li i in. 2021].

Nanocząstki tlenku cynku bezpośrednio lub poprzez uwalniane jony cynku wchodzą w interakcje z komórkami i mogą uszkadzać organelle komórkowe, takie jak chloroplasty, błony komórkowe, wakuole, jądro komórkowe [Kouhi i in. 2015, Wang 2018, Rajput i in. 2021]. Po ekspozycji na nanocząstki tlenku cynku (85 nm ; $0,2 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$; $0,4 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$) w komórkach merystematycznych korzenia cebuli zwyczajnej obserwowano utratę integralności błony komórkowej, zwiększone aberracje chromosomowe, powstawanie mikrojąder, pęknięcia nici DNA i zatrzymanie cyklu komórkowego w punkcie kontrolnym G2/M [Ghosh i in. 2016]. Stwierdzono też silną korelację między spadkiem indeksu mitotycznego a cytotoksycznością ZnONPs. Dużo wyższe stężenia ZnONPs ($2 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ i $4 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$) oddziaływały genotoksycznie i mutagenicznie na komórki korzeni siewek gryki [Lee i in. 2013].

W roślinach tytoniu zaobserwowano zwiększone uszkodzenie DNA w jądrach komórkowych zarówno korzeni, jak i liści pod wpływem ZnONPs (85 nm ; $0,2 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$; $0,4 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$) [Ghosh i in. 2016]. Efekty genotoksyczne wywoływane przez ZnONPs potwierdzono też dla czosnku [Shaymurat i in. 2012].

Nanocząstki tlenku cynku mogą być pobierane przez korzenie, dlatego też proliferacja komórek korzenia, a tym samym przyrost korzeni może być pomocnym parametrem przy określeniu toksycznych stężeń tych nanocząstek dla rośliny. Stwierdzono, że ZnONPs znacząco poprawiało wzrost korzeni kukurydzy przy stężeniu $10 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, stężenie

100 mg·dm⁻³ nie wpływało na wydłużanie korzeni, a stężenie 1000 mg·dm⁻³ istotnie zmniejszało długość korzeni. Natomiast w przypadku roślin ogórka wraz ze wzrostem stężenia ZnONPs wyraźnie zmniejszał się wzrost korzeni [Zhang i in. 2015]. Podobnie niska dawka ZnONPs (50 mg·dm⁻³) wpływała pozytywnie na wzrost korzeni siewek kapusty rzepek i gorczycy sarepskiej, natomiast wyższe stężenie (100 mg·dm⁻³) było toksyczne dla obu gatunków [Feigl i in. 2013]. Wydłużenie korzeni soi odnotowano przy dawce ZnONPs 500 mg·dm⁻³, natomiast wyższe stężenia nanocząstek powodowały zmniejszenie długości korzeni [López-Moreno i in. 2010].

Obserwowano też zmiany morfologii komórek w roślinach rosnących w obecności nanocząstek ZnONP. Komórki korzenia kapusty rzepek miały rozmiar mniejszy niż kontrolne, błona plazmatyczna odstawała od ścian komórkowych, w zdeformowanych plastydach były małe ziarna skrobi. W komórkach mezofilu w liściach obserwowano mniej chloroplastów a ich ultrastruktura różniła się od komórek kontrolnych. Chloroplasty roślin traktowanych nanocząstkami tlenu cynku były wyraźnie większe, zawierały dużo większe ziarna skrobi, miały liczniejsze, ale mniejsze plastoglobule oraz mniejsze mitochondria [Kouhi i in. 2015]. Efekty oddziaływania nanocząstek ZnO obserwowano też w komórkach jęczmienia zwyczajnego [Rajput i in. 2021]. Jednak w komórkach mezofilu tej rośliny chloroplasty uległy zmniejszeniu pod wpływem nanocząstek tlenu cynku, miały nieregularny kształt, nieprawidłową organizację tylakoidów i zmniejszoną aktywność fotosyntetyczną. Podobnie zmniejszenie zawartości chlorofilu pod wpływem ZnONPs zauważono w zielonym groszku [Mukherjee i in. 2014], w siewkach fasoli mung i ciecierzycy [Mahajan i in. 2011]. Także w liściach pszenicy traktowanych ZnONPs (100 nm) stwierdzono zmniejszenie zawartości chlorofilu [Dimkpa i in. 2012]. Również w liściach pomidora fitotoksyczne działanie wysokich stężeń ZnONPs (400 i 800 mg·dm⁻³) wpływało na funkcjonowanie chloroplastów. W tym doświadczeniu potwierdzono, że nanocząstki tlenu cynku powodują zmniejszenie zawartości chlorofilu a i chlorofilu b, spadek wydajności fotosyntezy i obniżenie parametrów fluorescencji chlorofilu [Wang i in. 2018]. Xu i in. [2018] podali, że ZnONPs w dawce 10 mg·dm⁻³ poprawiły fotosyntezę i biomasałę uprawianej w glebie.

W roślinach pomidora ZnONPs zwiększyły transkrypcję genów związanych ze zdolnością przeciwutleniającą. Autorzy postulują, że mogą one wzmacniać odpowiedź obronną poprzez zwiększanie aktywności enzymów antyoksydacyjnych [Wang i in. 2018]. W kulturach *in vitro* banana ZnONPs indukowały syntezę proliny, zwiększały aktywność dysmutazy ponadtlenkowej, katalazy i peroksydazy, ważnych czynników chroniących przed stresem oksydacyjnym [Helaly i in. 2014]. Siewki pszenicy, które wyrosły z nasion zaprawianych ZnONPs, miały znacząco większą zawartość barwników fotosyntetycznych i wyższą wydajność fotosyntezy. Nanocząstki tlenu cynku wpływały na aktywność enzymów, takich jak peroksydaza, katalaza, dysmutaza ponadtlenkowa i stopień utleniania lipidów [Rai-Kalal i Jajoo-Plant 2021]. Wolnorodnikowy mechanizm oddziaływania ZnONPs udowodniono w tkankach pszenicy, gdzie obserwowano podwyższone stężenie markera stresu oksydacyjnego – dialdehydu malonowego i niższy poziom zredukowanego glutationu [Rai-Kalal i Jajoo-Plant 2021]. Objawy stresu oksydacyjnego w roślinach pszenicy traktowanych ZnONPs (100 nm) przejawiały się zwiększoną peroksydacją lipidów i wyższym stężeniem utlenionego glutationu, wyższą aktywnością peroksydazy i katalazy w komórkach korzenia [Dimkpa i in. 2020].

Obecność nanocząstek i/lub podwyższona ilość jonów cynku w komórkach prowadzi do nadprodukcji reaktywnych form tlenu i uszkodzeń składników komórkowych cha-

rakterystycznych dla stresu oksydacyjnego. Adaptacja komórek do stresu oksydacyjnego może przejawiać się w autofagii, celem tego procesu jest usunięcie uszkodzonych organeli i proteoliza nieprawidłowych białek. W hodowli komórek tytoniu BY-2 obserwowano objawy stresu oksydacyjnego wywołanego ZnONPs (50 nm, 400 mg·dm⁻³), którym towarzyszyła utrata integralności błony komórkowej, ale także wakuolizacja komórek i zwiększona aktywność proteazy, co koreluje z nasileniem procesów autofagii [Balážová i in. 2020]. Rozległą wakuolizację cytoplazmy obserwowano w komórkach roślin bobu (30 nm ZnONPs; 100 i 200 mg·dm⁻³) [Youssef i Elamawi 2020]. Również w komórkach korowych korzeni życicy wakuolizacja zachodząca pod wpływem ZnONPs sugeruje uruchomienie mechanizmów obronnych przed stresem [Lin i Xing 2008].

Nanocząstki tlenku cynku, zwykle w niskich stężeniach, poprzez mechanizm wolnorodnikowych oddziaływań wpływają na system antyoksydacyjny komórek roślinnych, a przez to mogą zwiększać odporność roślin i tolerancję na stesy środowiskowe. W roślinach pomidora ZnONPs (o stężeniu 20 mg·dm⁻³ lub 100 mg·dm⁻³) zwiększały ekspresję genów zaangażowanych w transport składników odżywczych, metabolizm węgla/azotu oraz metabolizm wtórny. Analizy transkryptomyczne i metabolomiczne wykazały, że opryskiwanie liści nanocząstkami tlenku cynku zwiększyło ekspresję genów kodujących enzymy antyoksydacyjne, transportery oraz enzymy lub regulatory zaangażowane w metabolizm węgla/azotu i metabolizm wtórny. Oprysk roztworem ZnONPs (o stężeniu 20 mg·dm⁻³ lub 100 mg·dm⁻³) poprawił w ten sposób reakcje przeciwwolnorodnikowe oraz zwiększył stężenie cukrów, aminokwasów i kwasów organicznych. Zastosowanie ZnONPs zwiększyło akumulację żelaza (Fe) w warunkach niedoboru tego składnika w liściach pomidora, zmniejszając uszkodzenia oksydacyjne wywołane niedoborem Fe i poprawiając zawartość składników mineralnych [Sun i in. 2020].

Sadzonki ogórka opryskiwane roztworem ZnONPs były w lepszej kondycji fizjologicznej niż próby kontrolne. Wskazywał na to wzrost zawartości chlorofilu, zwiększenie parametrów fluorescencji chlorofilu oraz wyższa świeża i sucha masa liści i korzeni opryskiwanych nanocząstkami roślin [Li i in. 2021]. Po ekspozycji dolistnej na 100 mg·dm⁻³ ZnONPs obserwowano zmiany metaboliczne w roślinach ogórka. Opryskiwanie dolistne ZnONPs indukowało istotne zmiany w profilu metabolitów sadzonek ogórka. W liściach ogórka aż 57 metabolitów wykazywało znacząco zmienione poziomy po ekspozycji na ZnONPs, były to aminokwasy, kwasy organiczne, cukry i glikozydy oraz metabolity wtórne. Ekspozycja dolistna na ZnONPs zwiększyła zawartość metioniny, tryptaminy i tryptofanu w liściach, wpływała na szlaki biosyntezy glikozydów flawonowych i flawonolowych, a także alkaloidów indolowych [Li i in. 2021].

Również w warunkach stresu związanego z zasoleniem nanocząstki tlenku cynku pozytywnie wpływają na metabolizm roślin. W roślinach pomidora zasolenie obniżyło poziom ekspresji genów dla dysmutazy ponadtlenkowej i peroksydazy glutationowej. Jednak gdy w warunkach zasolenia zastosowano ZnONPs (15 i 30 mg·dm⁻³) ekspresja genów dla tych kluczowych enzymów antyoksydacyjnych była zbliżona do kontroli [Alharby i in. 2016.]. Wykazano również, że w uprawie pszenicy nanocząstki tlenku cynku poprawiają tolerancję na stres suszy. Pod wpływem stresu solnego w liściach i korzeniach roślin traktowanych ZnONPs stwierdzono zwiększoną akumulację metabolitów, głównie zawartości białka, rozpuszczalnych cukrów, co poprawiło tolerancję roślin szupinu, należącego do rodziny bobowatych na zasolenie [Wan i in. 2020].

Mechanizmy oddziaływania nanocząstek tlenku cynku na komórki są wielokierunkowe i złożone. Nanocząstki tlenku cynku mogą bezpośrednio lub poprzez uwalniane jony

cynku oddziaływać ze składnikami komórkowymi i organellami. Nanocząstki tlenku cynku wpływają na biochemiczne procesy w komórkach, powodują zaburzenie homeostazy redoks komórki przez generowanie reaktywnych form tlenu (bezpośrednio przez nanocząstki lub przez uwalniane jony cynku), wywołują reakcję stresową i stymulują system ochrony antyoksydacyjnej komórki, wpływają też na ekspresję genów i tym samym na ilość kodowanych przez nie białek lub enzymów.

WPLYW NANOCZĄSTEK TLENKU CYNKU NA WZROST I PLONOWANIE ROŚLIN

Dane literaturowe przedstawiają zarówno pozytywne (tab. 1), jak i negatywne (tab. 2) skutki wpływu ZnONPs na rośliny. Stymulujący lub hamujący wpływ nanocząstek tlenku cynku obserwowano zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i polowych. Dotyczył on różnych aspektów fizjologii rośliny: kiełkowania, wzrostu, produkcji biomasy, terminu kwitnienia, wytwarzania nasion, ilości i jakości pozyskanej biomasy. Gdy porównywano wpływ różnych stężeń nanocząstek cynku i tlenku cynku na pomidory i pszenicę, to obserwowano różnice w oddziaływaniu obu form tego związku [Amooaghaie i in. 2017]. Przy niższych stężeniach obie formy tego związku zwiększały parametry kiełkowania nasion i wzrostu, podczas gdy przy wyższych stężeniach negatywnie wpływały na parametry wzrostu. Jednak przy wyższych stężeniach to nanocząstki tlenku cynku wykazywały większą toksyczność na kiełkowanie nasion, parametry wzrostu oraz zawartość chlorofilu i karotenoidów, a także zwiększały bioakumulację cynku w roślinie. Objawem toksyczności ZnONPs był stres oksydacyjny, zmiany aktywności enzymów antyoksydacyjnych i stężenia proliny w porównaniu z roślinami kontrolnymi [Amooaghaie i in. 2017].

W wielu badaniach potwierdzono, że nanocząstki tlenku cynku przyspieszają wzrost i rozwój roślin, jednak ich wpływ różni się w zależności od rośliny. Gdy porównywano wpływ nanocząstek tlenku cynku na blisko spokrewnione gatunki kapustowatych, okazało się, że rośliny gorczyicy sarepskiej były bardziej tolerancyjne na ZnONPs niż rośliny kapusty rzepek [Feigl i in. 2013].

Zazwyczaj ZnONPs stosowany w niższych stężeniach korzystnie wpływa na parametry wzrostu roślin. Kiedy badano oddziaływanie $1600 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ ZnONPs na kiełkowanie nasion ogórka, lucerny i pomidora, tylko w przypadku ogórka stwierdzono pozytywne efekty [De la Rosa i in. 2013]. Kiełkowanie nasion ogórka wzrosło o 10%, a kiełkowanie lucerny i pomidora zmniejszyło się odpowiednio o 40% i 20%. Nasiona fasoli mung i ciecierzycy kiełkowano na pożywce agarowej w obecności różnych stężeń ZnONPs, najlepsze parametry wzrostu stwierdzono przy $20 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ nanocząstek dla sadzonek fasoli mung i $1 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ dla sadzonek ciecierzycy, wyższe stężenia hamowały wzrost siewek [Mahajan i in. 2011]. Korzystny wpływ nanocząstek ZnO na kiełkowanie nasion, przyspieszenie wzrostu, rozwoju i zwiększenie plonowania roślin orzecha ziemnego potwierdzono dla niższych dawek ($1000 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$), ale przy wyższych stężeniach ($2000 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$) obserwowano szkodliwe efekty ich działania [Prasad i in. 2012]. Udowodniono też, że zaprawianie nasion i powlekanie nasion tlenkiem cynku ma korzystny wpływ na wzrost i rozwój roślin kukurydzy. Nasiona kukurydzy traktowano ZnONPs (25 nm) przy stężeniach od 50 do $2000 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. Proces kiełkowania i wzrostu siewek najkorzystniej zachodził przy stężeniu $1500 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ ZnONPs, natomiast najwyższy plon ziarna ($3298 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$) uzyskano przy dawce $400 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ [Subbiah i in. 2016]. Korzystny wpływ zaprawiania nasion pszenicy nanocząstkami tlenku cynku ($10 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$) przejawia się większą zdolnością kiełkowania

w porównaniu z nasionami nie poddanymi jego działaniu [Prajapati i in. 2018]. Porównano też wpływ ZnONPs na wczesne etapy rozwoju wybranych roślin, efekty toksyczności obserwowano w przypadku ogórka przy niższych stężeniach niż w przypadku kukurydzy [Zhang i in. 2015]. Potwierdzono, że dolistne zastosowanie ZnONPs 50 nm na ogórki jest korzystne dla wzrostu roślin. Opryskiwanie dolistne ZnONPs poprawiło biologiczne parametry charakteryzujące rośliny ogórka, na co wskazywał wzrost zawartości chlorofilu, parametrów fluorescencji chlorofilu oraz świeżej/suchej masy liści i korzeni [Li i in. 2021]. Inne badania wykazały, że opryskiwanie dolistne ZnONPs poprawiło wzrost roślin szupinu [Wan i in. 2020]. W porównaniu z roślinami kontrolnymi opryskiwanie dolistne ZnONPs zwiększyło świeżą masę korzeni, suchą masę liści i zawartość rozpuszczalnego cukru w roślinach. Dodatkowo odnotowano ochronny wpływ nanocząstek tlenku cynku w warunkach stresu solnego, jakim poddano te rośliny [Wan i in. 2020].

Korzystny wpływ ZnONPs na roślinę przypisuje się głównie dostarczaniu jonów cynku jako niezbędnego składnika mineralnego [Mirzaei i Darroudi 2017]. Dlatego też rośliny kukurydzy, wrażliwe na niedobory cynku, są często obiektem badań nad ich reakcją na ZnONPs. Przeprowadzono badania na nasionach kukurydzy zaprawianych zawieszoną ZnONPs. Nasiona zaprawiane zawieszoną o stężeniu $50 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ szybciej kiełkowały. Jednak przy stężeniu $240 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ i wyższym stwierdzono negatywny wpływ na proces kiełkowania [Segatto i in. 2018]. Przy dogłębowej aplikacji nanocząstek tlenku cynku o stężeniu $2 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ potwierdzono, że zwiększa się tempo wzrostu roślin, powierzchnia liści i plonowanie kukurydzy typu single cross 704 (SC704). Autorzy ci zalecają nawożenie nanocząstkami tlenku cynku upraw kukurydzy na glebach ubogich w ten składnik mineralny [Taheri i in. 2015].

Przeprowadzono też badania dotyczące wzrostu i plonowania kukurydzy pod wpływem ZnONPs [Vijay 2022]. Nawożenie ZnONPs (stężenie 50, 100, 200 i $300 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$) stosowano w dwu fazach wzrostu (wydłużania pędu i rozwoju wiechy). W kilku wariantach nawożenia uzyskano znaczące zwiększenie plonu, ale największy wpływ na plon stwierdzono dla dawki ZnONPs $300 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$. Długość, masa, obwód kolby oraz plon ziarna były wyższe niż przy nawożeniu ZnSO_4 [Vijay 2022].

Niedobór cynku ogranicza także wzrost roślin ryżu, dlatego też doświadczenia nad nawożeniem ZnONPs mają duże znaczenie w produkcji tego zboża. W uprawie wazonowej przy nawożeniu $0,3\text{--}4,8 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ZnONPs uzyskano zwiększoną produkcję ziarna, większą masę 1000 ziaren, ziarno z wyższą zawartością cynku, amylozy i białka, szybszy wzrost roślin z większą liczbą wiech [Zhang i in. 2021].

Kolejny przykład też potwierdza możliwości zwiększenia plonu ryżu pod wpływem nawożenia ZnONPs. W badaniach doniczkowych zastosowano te nanocząstki w formie oprysku dolistnego ($0,5$; $1,0$ i $5,0 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$). Najlepsze parametry wzrostu i plonowania uzyskano po dolistnej aplikacji $5,0 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ZnONP [Bala i in. 2019]. W innym doświadczeniu stwierdzono, że nanocząstki tlenku cynku o stężeniu $30 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ wywoływały objawy toksyczne dla sadzonek ryżu. Biomasa roślin ryżu spadła o 12,3% w porównaniu do kontroli, a dodatkowo na powierzchni liści sadzonek pojawiły się objawy nekrozy, co pośrednio wskazuje na przedostaniu się nanocząstek do ich tkanek miękiszowych [Chen i in. 2015]. Zbadano również wpływ nanocząstek tlenku cynku na korzenie ryżu. Pod uwagę wzięto procent kiełkowania nasion, długość i liczbę korzeni. Stwierdzono, że ZnONP o stężeniu $2000 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ nie ma wpływu na parametry kiełkowania nasion. Jednak nanocząstki w tym badanym stężeniu szkodliwie oddziałują na siewki ryżu, gdyż zmniejszają długość i liczbę korzeni [Boonyanitipong i in. 2011, Singh i in. 2023].

Tabela 1. Przykłady stymulującego wpływu ZnONPs na rośliny
 Table 1. Examples of the stimulating effect of ZnONPs on plants

Gatunek rośliny Plant species	Wielkość nanocząstek Nanoparticle size (nm)	Stężenie Concentration	Efekt/Effect	Źródło Source
1	2	3	4	5
Kukurydza Corn	16–20	8 mg·dm ⁻³	zwiększenie długości korzeni i pędów po 35 dniach od siewu, świeżej i suchej masy korzeni i pędów increase in root and shoot length after 35 days from sowing, as well as the fresh and dry weight of roots and shoots	Sabir i in. 2020
	100	50–2000 mg·dm ⁻³ ·ha ⁻¹	w uprawie polowej najwyższy procent kiełkowania i wskaźnik wigoru siewek po zastosowaniu oprysku 1500 mg·dm ⁻³ ·ha ⁻¹ ZnONPs, najwyższą akumulację cynku w ziarnach odnotowano przy zastosowaniu 100 mg·dm ⁻³ ·ha ⁻¹ in field cultivation, the highest percentage of germination and seedling vigor index were observed after applying a spray of 1500 mg·dm ⁻³ ·ha ⁻¹ ZnONPs, the highest accumulation of zinc in grains was recorded with the application of 100 mg·dm ⁻³ ·ha ⁻¹	Subbaiah i in. 2016
	20–100	50 mg·dm ⁻³	wyższy procent kiełkowania nasion higher percentage of seed germination	Segatto i in. 2018
	20	2 mg·dm ⁻³	zwiększenie powierzchni liści, zwiększenie suchej masy liści increase in leaf surface area, increase in leaf dry weight	Taheri i in. 2015
	100	300 mg·dm ⁻³	po oprysku dolistnym w fazie wydłużania pędu i fazy rozwoju wiechy nastąpiło zwiększenie długość kolby, masy kolby, obwodu kolby oraz plonu ziarna after foliar spraying during the shoot elongation and panicle development stages, there was an increase in cob length, cob weight, cob circumference, and grain yield	Vijay i in. 2022

c.d. tab. 1

1	2	3	4	5
Len Flax	brak danych	20–60 mg·dm ⁻³	stymulujący wpływ na wzrost i plon lnu, zwiększenie stężenia barwników fotosyntetycznych, wolnych aminokwasów i węglowodanów stimulating effect on the growth and yield of flax, increase in the concentration of photosynthetic pigments, free amino acids, and carbohydrates	Sadak i Bakry 2020
Pszemica Wheat	≥1	1,7 mg·dm ⁻³	przyspiesza rozwój fenologiczny pszenicy, plon nasion w warunkach stresu suszy accelerate the phenological development of wheat, increase seed yield under drought stress conditions	Hasan i in. 2020
	100	1000 mg·dm ⁻³ ·ha ⁻¹	zaprawianie nasion a następnie dolistne opryski stymulowały krzewienie roślin, zwiększenie wysokości roślin, długości kłosów, plonu ziarna i słomy, zawartości cynku w ziarnie i słomie seed dressing followed by foliar sprays stimulated plant tillering, increased plant height, spike length, grain and straw yield, as well as zinc content in grain and straw	Dimpka i in. 2012
Groch Garden peas	>10	100 mg·dm ⁻³ 150 mg·dm ⁻³ 200 mg·dm ⁻³	zwiększenie całkowitego plonu strąków, całkowitego chlorofilu, masy 100 nasion, średniej świeżej masy zielonki i liczby zielonych strąków na roślinę increase in total pod yield, total chlorophyll, 100 seed weight, average fresh forage weight, and number of green pods per plant	Macak i in. 2020

Zdaniem ekspertów niedobór cynku jest jednym z głównych problemów w uprawie pszenicy na świecie. W doświadczeniu polowym zastosowano kompleksowe nawożenie pszenicy nanocząstkami tlenku cynku (1000 mg·dm⁻³), stosując najpierw zaprawianie nasion, a później trzykrotnie opryskiwano rośliny. Zabiegi te zwiększyły wysokość roślin, długość kłosów, plon ziarna i słomy, zawartość cynku w ziarnie i słomie [Prajapati i in. 2018]. Plon pszenicy wysiewanej z nasion traktowanych koloidalnym roztworem nanocząstek żelaza, miedzi, magnezu i cynku zwiększył się średnio o 20–25% [Batsmanova i in. 2013]. Również dla roślin pszenicy potwierdzono, podobnie jak u innych gatunków roślin, że przy niższych stężeniach nanocząstek tlenku cynku następuje poprawa paramet-

Tabela 2. Przykłady negatywnego oddziaływania ZnONPs na rośliny
 Table 2. Examples of the negative impact of ZnONPs on plants

Roślina Plant	Dawka ZnONPs ZnONPs dose (mg·dm ⁻³)	Efekt/Effect	Źródło Source
1	2	3	4
Soczewica Lentils	2–100	opóźnienie czasu kiełkowania germination time delay	Gokak i Taranath 2015
Lucerna siewna, pomidor Alfalfa, tomato	1600	zmniejszenie siły kiełkowanie odpowiednio o 40% i 20% reduction of germination vigor by 40% and 20% respectively	de la Rosa i in. 2013
Gryka Buckwheat	10–2000	zmniejszenie zawartości biomasy reduction of biomass content	Lee i in. 2013
Pszenica Wheat	500	zmniejszenie wzrostu korzeni reduction of root growth	Dimpka i in. 2012
Soja Soy	500	zaprzeszanie produkcji nasion cessation of seed production	Yoon i in. 2014
	0,05–0,5	chloroza liści, martwica leaf chlorosis, necrosis	Priester i in. 2017
Rajgras Ryegrass	2000	hamowanie kiełkowania nasion i wydłużania korzeni inhibition of seed germination and root elongation	Lin i Xing 2007
Szpinak Spinach	1000	długość korzeni i pędów, niższa biomasa, obniżenie stężenia chlorofili i karotenoidów shorter roots and shoots, lower biomass, lower concentration of chlorophylls and carotenoids	Kumar 2016
Negatywny wpływ na procesy komórkowe/ Negative impact on cellular processes			
Soja Soy	2000; 4000	efekty genotoksyczne genotoxic effects	Lopez-Moreno i in. 2010
Gryka Buckwheat	2000; 4000	polimorfizm DNA DNA polymorphism	Lee i in. 2013

c.d. tab. 2

1	2	3	4
Cebula Onion	5; 10; 20; 40; 80	wpływ na podział komórek mitotycznych w wierzchołkach korzeni: nieprawidłowości tworzenie mostków anafazowych, anafaza diagonalna, nieprawidłowości metafazy influence on mitotic cell division in root tips: abnormalities in the formation of anaphase bridges, diagonal anaphase, metaphase irregularities	Fadoju i in. 2020
	0,2; 0,4; 0,8	utrata integralności błony komórkowej, aberracje chromosomowe, tworzenie się mikrojąder, pęknięcia nici DNA i zatrzymanie cyklu komórkowego w punkcie kontrolnym G2/M loss of cell membrane integrity, chromosomal aberrations, micronucleus formation, DNA strand breaks, and cell cycle arrest at the G2/M checkpoint	Ghosh i in. 2016
Rzepak Rape	100	zmiany anatomiczne i ultrastrukturalne w różnych komórkach korzeni i liści anatomical and ultrastructural changes in various root and leaf cells	Kouhi i in. 2015

trów kiełkowania i stymulacja wzrostu, natomiast przy wyższych – zahamowanie wzrostu lub efekty toksyczne. Niższe stężenia ZnONPs działały stymulująco na rośliny pszenicy, zaś wyższe hamująco. Stężenia Zn odpowiadające Zn rozpuszczonemu ($3\text{--}23\text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$) z nanocząstek nie wpływały istotnie na wskaźniki kiełkowania [Batsmanova i in. 2013].

Doświadczenia nad wpływem ZnONPs na wzrost i plonowanie prowadzono też w uprawach roślin bobowatych grubonasiennych. W badaniach polowych ZnONPs w dawce $1000\text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ wpłynęły na poprawę wzrostu korzeni, zawartość chlorofilu w liściach i biomasę orzeszków ziemnych [Prasad i in. 2012]. W Indiach przeprowadzono badania polowe na roślinach orzecha ziemnego. Nasiona orzeszków ziemnych traktowano ZnONPs (średnia wielkość cząstek 25 nm, stężenie $1000\text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$) co promowało zarówno kiełkowanie nasion, wigor siewek, sprzyjało wczesnemu kwitnieniu i wyższej zawartości chlorofilu w liściach oraz zwiększyło tempo wzrostu łodyg i korzeni. Również plon nasion był o 34% wyższy w porównaniu z nawożeniem chelatowanym ZnSO_4 [Prasad i in. 2012].

Doświadczenia nad wpływem nanocząstek tlenku cynku prowadzono też na innych roślinach bobowatych. Soję uprawiano na glebie wzbogaconej w ZnONPs (w stężeniach 0,05; 0,1; i $0,5\text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ gleby). Stwierdzono, że stężenie chlorofilu w liściach soi zmniejszyło się, ale nie spowodowało to obniżenia parametrów wzrostu i plonu roślin [Priester i in. 2017]. Fasola zwyczajna jest rośliną wrażliwą na niedobory cynku. Po zastosowaniu nanocząstek tlenku cynku w uprawie tej rośliny otrzymano wyższą biomasę roślin, wyż-

szy plon, oraz wyższe stężenie cynku w nasionach [Ponce-García i in. 2010]. W badaniach oceniających wpływ nanotlenku cynku na bób stwierdzono wyższą zawartość azotu i białka w jego nasionach.

Wyniki przedstawionych badań pokazują, że bezpośrednie narażenie na ZnONPs powoduje znaczną fitotoksyczność, podkreśla potrzebę unieszkodliwiania odpadów zawierających nanocząstki, a także konieczność dalszych badań nad ich wpływem w systemach rolniczych i środowiskowych.

WNIOSKI

Rozwój nanotechnologii przybliżył perspektywę powszechnego wykorzystania nanocząstek w rolnictwie. Obecnie wielu naukowców prowadzi badania nad zrozumieniem wpływu ZnONPs na wzrost i rozwój roślin. Zastosowanie nawożenia cynkiem w postaci nanocząstek ma wiele zalet, może stymulować kiełkowanie, rozwój roślin, zwiększyć plon. Jak pokazano na przykładzie danych literaturowych, aby uzyskać korzystny wpływ na rozwój roślin należy precyzyjnie określić dawkowanie ZnONPs i poznać interakcje nanocząstek z roślinami. Dawka nanonawozów tlenku cynku dopasowana do gatunku rośliny i fazy jej rozwoju może wpłynąć na poprawę jakości plonu i zdrowotność roślin. Rośliny zdolne są do bioakumulacji cynku, co może korzystnie wpłynąć na zaspokojenie potrzeb na ten niezbędny mikroelement w żywieniu człowieka i zwierząt. Nanonawozy cynkowe mają duży potencjał zastosowania w rolnictwie, gdyż powodują wzrost efektywności wykorzystania składników pokarmowych i minimalizują potencjalne negatywne skutki związane z ich przedawkowaniem. Jednak oprócz potencjalnych korzyści nanotlenek cynku może wywoływać efekty toksyczne u roślin. Oddziaływania nanocząstek na organizmy roślinne to ciągle jeszcze mało poznane zagadnienie, dlatego też powszechne stosowanie nanocząstek tlenku cynku w rolnictwie wymaga poznania potencjalnych skutków ubocznych stosowania ZnONPs w różnych warunkach i wobec różnych elementów środowiska.

PIŚMIENNICTWO

- Alharby H.F., Metwali E.M., Fuller M.P., Aldhebiani A.Y., 2016. The alteration of mRNA expression of SOD and GPX genes, and proteins in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) under stress of NaCl and/or ZnO nanoparticles. *Saudi J. Biol. Sci.* 23, 773–781. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.04.012>
- Alloway B.J., 2009. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and human. *Environ. Geochem. Health* 31, 537–548. <https://doi.org/10.1007/s10653-009-9255-4>
- Akbar S., Tauseef I., Subhan F., Sultana N., Khan I., Ahmed U., Haleem K.S., 2020. An overview of the plant-mediated synthesis of zinc oxide nanoparticles and their antimicrobial potential. *Inorg. Nano-Met. Chem.* 50, 961–973. <https://doi.org/10.1080/24701556.2019.1711121>
- Amooghaie R., Norouzi M., Saeri M., 2017. Impact of zinc and zinc oxide nanoparticles on the physiological and biochemical processes in tomato and wheat. *Botany* 95, 441–455. <https://doi.org/10.1139/cjb-2016-0194>
- Avellan A., Yun J., Morais B.P., Clement E.T., Rodrigues S.M., Lowry G.V., 2021. Critical review: role of inorganic nanoparticle properties on their foliar uptake and in planta translocation. *Environ. Sci. Technol.* 55, 13417–13431. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c00178>

- Bala R., Kalia A., Singh Dhaliwal S., 2019. Evaluation of efficacy of ZnO nanoparticles as remedial zinc nanofertilizer for rice. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 19, 379–389. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00040-z>
- Balázsová L., Baláz M., Babula P., 2020. Zinc oxide nanoparticles damage tobacco BY-2 cells by oxidative stress followed by processes of autophagy and programmed cell death. *Nanomaterials* 10, 1066. <https://doi.org/10.3390/nano10061066>
- Batsmanova L. M., Gonchar L.M., Taran N.Y., Okanenko A.A., 2013. Using a colloidal solution of metal nanoparticles as micronutrient fertiliser for cereals (Doctoral dissertation, Sumy State University). *Proc. Inter. Con. Nanomat.: Applicat. Propert.* 2(4), 04NABM14.
- Bian X., Shi L., Yang X., Lu X., 2011. Effect of nano-TiO₂ particles on the performance of PVDF, PVDF-g-(maleic anhydride), and PVDF-g-Poly (acryl amide) membranes. *Ind. Eng. Chem. Res.* 50(21), 12113–12123. <https://doi.org/10.1021/ie200232u>
- Boonyanitipong P., Kumar P., Kositsup B., Baruah S., Dutta J., 2011. Effects of zinc oxide nanoparticles on roots of rice *Oryza sativa* L. *Int. Conf. Environ. BioSci.* 21, 172–176. <https://doi.org/10.1139/cjb-2016-0194>
- Broadley M.R., White P.J., Hammond J.P., Zelko I., Lux A., 2007. Zinc in plants. *New Phytol.* 173(4), 677–702. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.01996.x>
- Cabot C., Martos S., Llugany M., Gallego B., Tolrà R., Poschenrieder C., 2019. A role for zinc in plant defense against pathogens and herbivores front. *Plant Sci.* 10, 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01171>
- Cakmak I., 2000. Possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species. *New Phytol.* 146(2), 185–205. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00630.x>
- Canaparo R., Foglietta F., Limongi T., Serpe L., 2020. Biomedical applications of reactive oxygen species generation by metal nanoparticles. *Materials* 14, 53. <https://doi.org/10.3390/ma14010053>.
- Carpita N.C., Gibeaut D.M., 1993. Structural models of primary cell walls in flowering plants: consistency of molecular structure with the physical properties of the walls during growth. *Plant J.* 3(1), 1–30. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313x.1993.tb00007.x>
- Chen J., Liu X., Wang C., Yin S.S., Li X.L., Hu W.J., Simon M., Shen Z.J., Xiao Q., Chu C.C., Peng X.X., Zheng H.L., 2015. Nitric oxide ameliorates zinc oxide nanoparticles-induced phytotoxicity in rice seedlings. *J. Hazard Mater.* 297, 173–182. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.04.077>
- Dimkpa C.O., Andrews J., Fugice J., Singh U., Bindraban P.S., Elmer W.H., Gardea-Torresdey J., White J.C., 2020. Facile coating of urea with low-dose ZnO nanoparticles promotes wheat performance and enhances Zn uptake under drought stress. *Fron. Plant. Sci.* 11, 168. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00168>
- Dimkpa C.O., McLean J.E., Latta D.E., Managón E., Britt D.W., Johnson W.P., Boyanov M.I., Anderson A.J., 2012. CuO and ZnO nanoparticles: phytotoxicity, metal speciation, and induction of oxidative stress in sand-grown wheat. *J. Nanopart. Res.* 14(9), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s11051-012-1125-9>
- Elumalai K., Velmurugan S., 2015. Green synthesis, characterization and antimicrobial activities of zinc oxide nanoparticles from the leaf extract of *Azadirachta indica* (L.). *Appl. Surf. Sci.* 345, 329–336. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.03.176>
- Fadoju O.M., Osinowo O.A., Ogunsuyi O.I., Oyeyemi I.T., Alabi O.A., Alimba C.G., Bakare A.A., 2020. Interaction of titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles induced cytogenotoxicity in *Allium cepa*. *Nucleus* 63, 159–166. <https://doi.org/10.1007/s13237-020-00308-1>
- Feigl G., Kumar D., Lehotai N., Tugyi N., Molnár Á., Ördög A., Kolbert Z., 2013. Physiological and morphological responses of the root system of Indian mustard (*Brassica juncea* L. Czern.) and rapeseed (*Brassica napus* L.) to copper stress. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 94, 179–189. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.04.029>
- Ghosh M., Jana, A., Sinha, S., Jothiramajayam M., Nag A., Chakraborty A., 2016. Effects of ZnO nanoparticles in plants: cytotoxicity, genotoxicity, deregulation of antioxidant defenses,

- and cell-cycle arrest. *Mutat. Res. Genet. Toxicol. Environ. Mutagen.* 807, 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2016.07.006>
- Gokak I.B., Taranath T.C., 2015. Seed germination and growth responses of *Macrotyloma uniflorum* (Lam.) *Verdc.* exposed to zinc and zinc nanoparticles. *Int. J. Environ. Sci.* 5(4), 840–847. <https://www.semanticscholar.org/paper/Seed-germination-and-growth-responses-of-uniflorum-Gokak-Taranath/2a9327c00930b28a0469e7f389a9657b2303b2e6> [dostęp: 10.01.2020].
- Hassan M. U., Aamer M., Chattha M. U., Haiying T., Shahzad B., Barbanti L., Rasheed M.N., Afzal A., Liu Y., Guoqin H., 2020. The critical role of zinc in plants facing the drought stress. *Agriculture* 10, 396. <https://doi.org/10.3390/agriculture10090396>
- Helaly M.N., El-Metwally M.A., El-Hoseiny H., Omar S.A., El-Sheery N.I., 2014. Effect of nanoparticles on biological contamination of in vitro cultures and organogenic regeneration of banana. *J. Crop Sci.* 8, 612 - 624. <https://www.semanticscholar.org/paper/Effect-of-nanoparticles-on-biological-contamination-Helaly-El-Metwally/b85acf81a4544f578145b0e2cf1fa1a491f7c16c> [dostęp: 10.01.2020].
- Helfenstein J., Pawlowski M.L., Hill C.B., Stewart J., Lagos-Kutz D., Bowen C.R., 2015. Zinc deficiency alters soybean susceptibility to pathogens and pests. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 178, 896–903. <https://doi.org/10.1002/jpln.201500146>
- Hernandez-Viezcás J.A., Castillo-Michel H., Servin A.D., Peralta-Videa J.R., Gardea-Torresdey J.L., 2011. Spectroscopic verification of zinc absorption and distribution in the desert plant *Prosopis juliflora-velutina* (*Velvet mesquite*) treated with ZnO nanoparticles. *J. Chem. Eng.* 170, 346–352. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.12.021>
- Jassby D., Cath T.Y., Buisson H., 2018. The role of nanotechnology in industrial water treatment. *Nature Nanotech.* 13, 670–672. <https://doi.org/10.1038/s41565-018-0234-8>
- Jiang J., Pi J., Cai J., 2018. The advancing of zinc oxide nanoparticles for biomedical applications. *Bioinorg. Chem. Appl.* 1062562. <https://doi.org/10.1155/2018/1062562>
- Kabała K., Janicka-Russak M., 2011. Differential regulation of vacuolar H⁺-ATPase and H⁺-PPase in *Cucumis sativus* roots by zinc and nickel. *Plant Sci.* 180, 531–539. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.11.013>
- Kaur H., Garg N., 2021. Zinc toxicity in plants: a review. *Planta* 253, 129. <https://doi.org/10.1007/s00425-021-03642-z>
- Korzeniowska J., 2009. Znaczenie cynku w uprawie pszenicy. *Post. Nauk Rol.* 2, 3–17. https://instytucja.pan.pl/images/stories/pliki/wydzialy/wydzial_v/dwum_pnr/2009/pnr_2_09.pdf [dostęp: 10.01.2020].
- Kouhi S.M.M., Lahouti M., Ganjeali A., Entezari M.H., 2015. Long-term exposure of rapeseed (*Brassica napus* L.) to ZnO nanoparticles: anatomical and ultrastructural responses *Environ. Sci. Pollut. Res.* 22, 10733–10743. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4306-0>
- Kumar A., 2016. Impact of irrigation using water containing CuO and ZnO nanoparticles on *Spinacia oleracea* grown in soil media. *Environ. Contam. Toxicol.* 97(4), 548–553. <https://doi.org/10.1007/s00128-016-1872-x>
- Lee S., Chung H., Kim S., Lee I., 2013. The genotoxic effect of ZnO and CuO nanoparticles on early growth of buckwheat, *Fagopyrum esculentum*. *Wat. Air Soil Poll.* 224, 1–11. <https://doi.org/10.1007/s11270-013-1668-0>
- Li S., Liu J., Wang Y., Gao Y., Zhang Z., Xu J., Xing G., 2021. Comparative physiological and metabolomic analyses revealed that foliar spraying with zinc oxide and silica nanoparticles modulates metabolite profiles in cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Food Energy Secur.* 101, 269. <https://doi.org/10.1002/fes3.269>
- Lin D., Xing B., 2007. Phytotoxicity of nanoparticles: inhibition of seed germination and root growth. *Environ Pollut.* 150(2), 243–250. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.01.016>
- López-Moreno M.L., De la Rosa G., Hernández-Viezcás J.A., Castillo-Michel H., Botez C.E., Peralta-Videa J.R., Gardea-Torresdey J.L., 2010. Evidence of the differential biotransformation and genotoxicity of ZnO and CeO₂ nanoparticles on soybean (*Glycine max*) plants. *Environ. Sci. Technol.* 44, 7315–7320. <https://doi.org/10.1021/es903891g>

- Macak M., Candrakova E., Dalovic I., Prasad P.V.V., Farooq M., Korczyk–Szabo J., Kovacic P., Simansky V., 2020. The influence of different fertilization strategies on the grain yield of field peas (*Pisum sativum* L.) under conventional and conservation tillage. *Agronomy* 10, 1728. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111728>
- Mahajan P., Dhoke S.K., Khanna A.S., 2011. Effect of nano-ZnO particle suspension on growth of mung (*Vigna radiata*) and gram (*Cicer arietinum*) seedlings using plant agar method. *J. Nanotechnol.* 7, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2011/696535>
- Martens D.C., Westermann D.T., 1991. Fertilizer applications for correcting micronutrient deficiencies. W: B.J. Alloway (red.), *Micronutrient deficiencies in global crop production*. Springer, 549–553.
- Mirzaei H., Darroudi M., 2017. Zinc oxide nanoparticles: biological synthesis and biomedical applications. *Ceram. Int.* 43, 907–914. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.10.051>
- Molnár A., Rónavári A., Bélteky P., Szöllösi R., Valyon E., Oláh D., Rázga Z., Ördög A., Kónya Z., Kolbert Z., 2020. ZnO nanoparticles induce cell wall remodeling and modify ROS/ RNS signalling in roots of *Brassica* seedlings, *Ecotoxicology* 206, 111158. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111158>
- Mukherjee A., Pokhrel S., Bandyopadhyay S., Mädler L., Peralta-Videa J.R., Gardea-Torresdey J.L., 2014. A soil mediated phyto-toxicological study of iron doped zinc oxide nanoparticles (Fe ZnO) in green peas (*Pisum sativum* L.). *J. Chem. Eng.* 258, 394–401. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.06.112>
- Navarro E., Baun A., Behra R., Hartmann N.B., Filser J., Miao A.J., Quigg A., Santschi P.H., Sigg L., 2008. Environmental behavior and ecotoxicity of engineered nanoparticles to algae, plants, and fungi. *Ecotoxicology* 17(5), 372–386. <https://doi.org/10.1007/s10646-008-0214-0>
- Petcu S.F., Oancea F., Siciua O.A., Constantinescu F., Dinu S., 2010. Responsive polymers for crop protection. *Polymer* 2, 229–251. <https://doi.org/10.3390/polym2030229>
- Ponce-García C.O., Soto-Parra J.M., Sánchez E., Muñoz-Márquez E., Piña-Ramírez F.J., Flores-Córdova M.A., Pérez-Leal R., Yáñez Muñoz R.M., 2010. Efficiency of nanoparticle, sulfate, and zinc-chelate use on biomass, yield, and nitrogen assimilation in green beans. *Agronomy* 9(3), 128. <https://doi.org/10.3390/agronomy9030128>
- Prajapati B.J., Patel S.B., Patel R.P., Ramani V.P., 2018. Effect of zinc nano-fertilizer on growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) under saline irrigation condition. *Agropedology* 28(01), 31–37. http://isslup.in/wp-content/uploads/2020/03/agropadiology_final-2-Chapter-5.pdf [do-step: 10.01.2020].
- Prasad T.N.V.K.V., Sudhakar P., Sreenivasulu Y., Latha P., Munaswamy V., Reedy K.R., Sreeprasad T.S., Sajanalal P.R., Pradeep T., 2012. Effect of nanoscale zinc oxide particles on the germination, growth and yield of peanut. *J. Plant Nutr.* 35, 905–927. <https://doi.org/10.1080/01904167.2012.663443>
- Priester J.H., Shelly C.M., Katherine E., Yuan G., Ying W., Roger M.N., Joshua P.S., Goggi S., Gardea-Torresdey, J.L., Patricia, A.H., 2017. Damage assessment for soybean cultivated in soil with either, CeO₂ or ZnO manufactured nanomaterials. *Sci. Total Environ.* 579, 1756–1768. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.149>
- Puzina T.I., 2004. Effect of zinc sulfate and boric acid on the hormonal status of potato plants in relation to tuberization. *Rus. J. Plant Physiol.* 51, 209–214. <https://doi.org/10.1023/b:rupp.0000019216.92202.4a>
- Rai-Kalal P., Jajoo-Plant A., 2021. Priming with zinc oxide nanoparticles improve germination and photosynthetic performance in wheat. *Plant Physiol. Biochem.* 60, 341–351. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.01.032>
- Rajput V.D., Singh A., Minkina T., Rawat S., Mandzhieva S., Sushkova S., Upadhyay S.K., 2021. Nano-enabled products: challenges and opportunities for sustainable agriculture. *Plants* 10, 2727. <https://doi.org/10.3390/plants10122727>

- Ramesh M., Palanisamy K., Babu K., Sharma N.K., 2014. Effects of bulk and nano-titanium dioxide and zinc oxide on physio-morphological changes in *Triticum aestivum* L. J. Glob. Biosci. 3(2), 415–422. <https://www.mutagens.co.in/jgb/vol.03/2/04.pdf>
- de la Rosa G., López-Moreno M.L., de Haro D., Botez C.E., Peralta-Videa J.R., Gardea-Torresdey J.L., 2013. Effects of ZnO nanoparticles in alfalfa, tomato, and cucumber at the germination stage: root development and X-ray absorption spectroscopy studies. Pure Appl. Chem. 85(12), 2161–2174. <https://doi.org/10.1351/pac-con-12-09-05>
- Sabir S., Zahoor M.A., Waseem M., Siddique M.H., Shafique M., Imran M., Muzammil S., 2020. Biosynthesis of ZnO nanoparticles using *Bacillus subtilis*: characterization and nutritive significance for promoting plant growth in *Zea mays* L. Dose-Response 18, 3. doi:10.1177/1559325820958911
- Sadak M.S., Bakry B.A., 2020. Zinc-oxide and nano ZnO effects on growth, some biochemical aspects, yield quantity, and quality of flax (*Linum uitaissimum* L.) in absence and presence of compost under sandy soil. Bull. Natl. Res. Cent. 44, 98. <https://doi.org/10.1186/s42269-020-00348-2>
- Segatto C., Ternus R., Junges M., Mello J.M.M., Luz J.L., Riella H.G., Fiori M.A., 2018. Adsorption and incorporation of the zinc oxide nanoparticles in seeds of corn: germination performance and antimicrobial protection. Journal IJAERS, 5, 2456–6495. <https://doi.org/10.22161/ijaers.5.5.37>
- Singh A., Sengar R.S., Shahi U.P., Rajput V.D., Minkina T., Ghazaryan K.A., 2023. Prominent effects of zinc oxide nanoparticles on roots of rice (*Oryza sativa* L.) grown under salinity stress. Stresses 3, 33–46. <https://doi.org/10.3390/stresses3010004>
- Shaymurat T., Gu J., Xu C., Yang, Z., Zhao Q., Liu Y., Liu Y., 2012. Phytotoxic and genotoxic effects of ZnO nanoparticles on garlic (*Allium sativum* L.): a morphological study. Nanotoxicology 6, 241–248. <https://doi.org/10.3109/17435390.2011.570462>
- Siebielec G., Stuczyński T., Terelak H., Filipiak K., Koza P., Korzeniowska-Puculek R., Łopatka A., Jadczyński J., 2018. Uwarunkowania produkcji rolniczej w regionach o dużym udziale gleb zanieczyszczonych metalami śladowymi. Stud. Rap. IUNG 58, 81–95. <https://doi.org/10.26114/sir.iung.2008.12.11>
- Subbaiah L.V., Prasad T.N., Krishna T.G., Sudhakar P., Reddy B.R., Pradeep T., 2016. Novel effects of nanoparticulate delivery of zinc on growth, productivity, and zinc biofortification in maize (*Zea mays* L.). J. Agric. Food Chem. 18, 3778–3788. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b00838>
- Sun L., Wang Y., Wang R., Wang R., Zhang P., Ju Q., Xu J., 2020. Physiological, transcriptomic, and metabolomic analyses reveal zinc oxide nanoparticles modulate plant growth in tomato. Environ. Sci. Nano. 7, 3587–3604. <https://doi.org/10.1039/D0EN00723D>
- Taheri M., Qarache H. A., Qarache A. A., Yoosefi M., 2015. The effects of zinc-oxide nanoparticles on growth parameters of corn (SC704). SFJ 1, 17–20. <https://doi.org/10.17975/sfj-2015-011>
- Thwala M., Musee N., Sikhwivhilu L., Wepener V., 2013. The oxidative toxicity of Ag and ZnO nanoparticles towards the aquatic plant *Spirodela punctata* and the role of testing media parameters. Environ. Sci.: Process. Impacts. 15, 1830–1843. <https://doi.org/10.1039/C3EM00235G>
- Taunk P.B., Das R., Bisen D.P., Tamrakar R.K., 2015. Structural characterization and photoluminescence properties of zinc oxide nano particles synthesized by chemical route method. J. Radiat. Res. Appl. 8, 433–438. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2015.03.006>
- Vijay F.V., 2022. Effect of zinc oxide nanoparticles (ZnONPs) on yield attributes and yield of hybrid maize (*Zea mays* L.). J. Pharm. Innov. 11, 225–228. <https://doi.org/10.22271/tpi.2022.v11.i8c.14670>
- Wan J., Wang R., Bai H., Wang Y., Xu J., 2020. Comparative physiological and metabolomics analysis reveals that single-walled carbon nanoforms and ZnO nanoparticles affect salt tolerance in *Sophora alopecuroides*. Environ. Sci. Nano 7(10), 2968–2981. <https://doi.org/10.1039/D0EN00582G>

- Wang X.P., Li Q.Q., Pei Z.M., Wang S.C., 2018. Effects of zinc oxide nanoparticles on the growth, photosynthetic traits, and antioxidative enzymes in tomato plants. *Biol. Plant.* 62, 801–808. <https://doi.org/10.1007/s10535-018-0813-4>
- Xu J., Luo X., Wang Y., Feng Y., 2018. Evaluation of zinc oxide nanoparticles on lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth and soil bacterial community. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 185, 91–100. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0953-7>
- Yoon S.J., Kwak J.I., Lee W.M., Holden, Y.J., 2014. An zinc oxide nanoparticles delay soybean development: a standard soil microcosm study. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 9, 131–137. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.10.014>
- Youssef M.S., Elamawi R.M., 2020. Evaluation of phytotoxicity, cytotoxicity, and genotoxicity of ZnO nanoparticles in *Vicia faba*. *ESPR* 27, 18972–18984. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3250-1>
- Zhang H., Wang R., Chen Z., Cui P., Lu H., Yang Y., Zhang H., 2021. The effect of zinc oxide nanoparticles for enhancing rice (*Oryza sativa* L.) yield and quality. *Agriculture* 11, 1247. <https://doi.org/10.3390/agriculture11121247>
- Zhang R., Zhang H., Tu C., Hu X., Li L., Luo Y., Christie P., 2015. Phytotoxicity of ZnO nanoparticles and the released Zn (II) ion to corn (*Zea mays* L.) and cucumber (*Cucumis sativus* L.) during germination. *Environ. Pollut.* 22, 11109–11117. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4325-x>
- Zhu J., Li J., Shen Y., Liu S., Zeng N., Zhan X., Xing B., 2020. Mechanism of zinc oxide nanoparticle entry into wheat seedling leaves. *Environ. Sci. Nano* 7, 3901–3913. <https://doi.org/10.1039/DOEN00658K>

Źródło finansowania: Dotacja MEiN na utrzymanie potencjału badawczego projekt VKT/S/1/2023.

Abstract. Nanomaterials containing zinc oxide are increasingly used in various industries, and in agriculture. Literature data confirm that zinc oxide nanoparticles can have a beneficial effect on germination, plant growth, photosynthesis and selected metabolic processes in various plant species. The use of zinc oxide nanoparticles can help to improve the yield of plants, but it is necessary to adjust the dose of this nanofertilizer to the stage of development and the plant species. Zinc oxide nanoparticles (ZnONPs) releases zinc ions, thus contributing to better nutrition of plants with this ingredient and may reduce soil pollution caused by excessive use of fertilizers. The use of zinc oxide nanoparticles may also be associated with toxicological risks for plants. Toxicity caused by ZnONPs may be manifested by reduced germination capacity, inhibition of growth, impaired cell division, abnormal gene expression, and symptoms of oxidative stress. The nanotoxicity of zinc oxide depends on the size of the nanoparticles, the dose and the plant species.

Keywords: zinc, zinc oxide nanoparticles, plants

Otrzymano/Received: 24.05.2023
Zaakceptowano/Accepted: 15.04.2024
Online first: 9.07.2024

