

Autoreferat

Dr Katarzyna Głowacka

ORCID: 0000-0002-3649-4669

**Katedra Fizjologii, Genetyki i Biotechnologii Roślin
Wydział Biologii i Biotechnologii**

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

Olsztyn, 2025

Spis treści

1. Dane osobowe.....	4
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.....	4
3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.	4
4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.).....	5
4.a Pierwsze osiągnięcie naukowe przedstawione do oceny.	5
4.a.1 Wykaz oryginalnych publikacji dokumentujących pierwsze osiągnięcie naukowe	5
4.a.2 Omówienie pierwszego osiągnięcia naukowego.....	7
4.a.2.1 Zarys koncepcji i cele badań.....	7
4.a.2.2 Opis osiągniętych wyników i ich znaczenia.....	10
4.a.2.3 Podsumowanie pierwszego osiągnięcia habilitacyjnego	18
4.a.2.4 Plany dalszych badań.....	19
4.a.2.5 Literatura.....	20
4.b Drugie osiągnięcie naukowe przedstawione do oceny.....	27
4.b.1 Wykaz publikacji dokumentujących drugie osiągnięcie naukowe	28
4.b.2 Omówienie osiągnięć wchodzących w skład drugiego osiągnięcia.....	29
4.b.2.1 Zarys koncepcji i cele badań.....	29
4.b.2.2 Opis osiągniętych wyników i ich znaczenia.....	31
4.b.2.3 Podsumowanie drugiego osiągnięcia habilitacyjnego	34
4.b.2.4 Plany dalszych badań.....	34
4.b.2.5 Literatura.....	35

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.....	37
5.a Współpraca naukowa z innymi ośrodkami badawczymi	38
6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę. 41	
6.a Osiągnięcia dydaktyczne	41
6.a.1 Działalność dydaktyczna i opieka naukowa nad studentami	41
6.a.2 Ukończone kursy i szkolenia podnoszące umiejętności dydaktyczne	42
6.b Osiągnięcia organizacyjne.....	43
6.c Osiągnięcia popularyzujące naukę lub sztukę.....	45
7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.	46

1. Dane osobowe

Imię i nazwisko

Katarzyna Głowacka

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

12 października 2001 r.: stopień doktora nauk biologicznych w dyscyplinie biologia

Wydział Biologii, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

Temat rozprawy doktorskiej pracy: **“Ultrastrukturalne i fizjologiczne badania procesu fotoperiodycznej indukcji kwitnienia *Pharbitis nil*”**

Promotor: prof. dr hab. Andrzej Tretyn

3 lipca 1997 r.: tytuł magistra biologii, specjalność biologia molekularna

Wydział Biologii i Nauk o Ziemi, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

Temat pracy magisterskiej: **„Immunocytochemiczna lokalizacja kalmoduliny w szyjce słupka *Petunia hybrida* Hort.”**

Promotor: prof. dr hab. Elżbieta Bednarska

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

Katedra Fizjologii, Genetyki i Biotechnologii Roślin, Wydział Biologii i Biotechnologii, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

1.10.2020 – obecnie:	adiunkt w grupie pracowników badawczo-dydaktycznych
15.12.2018 – 30.09.2020:	adiunkt w grupie pracowników dydaktycznych
1.03.2017 – 14.12.2018:	asystent
1.12.2001 – 28.02.2017:	adiunkt

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.).

4.a Pierwsze osiągnięcie naukowe przedstawione do oceny.

Tytuł osiągnięcia naukowego: „Fizjologiczna odpowiedź grochu siewnego (*Pisum sativum* L.) na stres kadmowy”

Pierwsze osiągnięcie naukowe przedstawione do oceny stanowi monotematyczny cykl czterech oryginalnych publikacji naukowych z lat 2019-2024. W trzech z nich **byłam pierwszym autorem oraz autorem korespondencyjnym**. Wszystkie publikacje ukazały się w indeksowanych bazach naukowych. Prace zostały przedstawione w układzie chronologicznym, a mój szczegółowy udział podano poniżej tytułu każdej publikacji.

Kopie publikacji zamieszczono w **Załączniku 5**, a oświadczenia współautorów o udziale w powstaniu tych prac – w **Załączniku 6**.

Podsumowanie naukometryczne:

Sumaryczny Impact Factor (IF), według **Journal Citation Reports (JCR)**, wymienionych prac, podany z uwzględnieniem roku wydania publikacji, wynosi **10,662**.

Sumaryczna liczba punktów wymienionych prac, według list punktowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (**MNiSW**), lub Ministerstwo Edukacji i Nauki (**MEiN**) dla czasopism naukowych, właściwych dla roku wydania publikacji, wynosi **310** punktów.

4.a.1 Wykaz oryginalnych publikacji dokumentujących pierwsze osiągnięcie naukowe

H 1_1 Głowacka, K., Żróbek-Sokolnik, A., Okorski, A., & Najdzion, J. (2019). The effect of cadmium on the activity of stress-related enzymes and the ultrastructure of pea roots. *Plants*, 8, 1–16. <https://doi.org/10.3390/plants8100413>

Punkty MniSW / MEiN – 70; Impact Factor – 2.762

Mój wkład polegał na sformułowaniu koncepcji badań (główny twórca koncepcji), wyborze metod i warunków eksperymentalnych; przeprowadzeniu doświadczenia (pobranie materiału biologicznego) oraz badań mikroskopowych (tkankowej lokalizacji H₂O₂), w tym analiza

ultrastruktury w mikroskopie elektronowym. Przeprowadziłam analizę wyników oraz napisałam i przygotowałam manuskrypt. Koordynowałam i przygotowałam odpowiedzi na recenzje oraz ostateczną wersję manuskryptu. Jestem autorem korespondencyjnym publikacji.

H 1_2 Głowacka, K., Olszewski, J., Sowiński, P., Kalisz, B., & Najdzion, J. (2022). Developmental and Physiological Responses of *Pisum sativum* L. after Short- and Long-Time Cadmium Exposure. *Agriculture (Switzerland)*, 12, 1–16.
<https://doi.org/10.3390/agriculture12050637>

Punkty MNiSW / MEiN – 100; Impact Factor – 3.6

Mój wkład polegał na sformułowaniu koncepcji badań (główny twórca koncepcji), wyborze metod i warunków eksperymentalnych; wykonaniu analizy rozwoju roślin, pomiaru fluorescencji chlorofilu (przy wykorzystaniu mikroskopu konfokalnego) oraz wykonaniu analiz w elektronowym mikroskopie skaningowym. Przeprowadziłam analizę wszystkich wyników, wraz z analizą statystyczną, napisałam i przygotowałam manuskrypt. Koordynowałam i przygotowałam odpowiedzi na recenzje oraz ostateczną wersję manuskryptu. Jestem autorem korespondencyjnym publikacji.

H 1_3 Orzoł, A., Gołębiowski, A., Szultka-Młyńska, M., **Głowacka, K.,** Pomastowski, P., & Buszewski, B. (2022). ICP-MS Analysis of Cadmium Bioaccumulation and Its Effect on Pea Plants (*Pisum sativum* L.). *Polish Journal of Environmental Studies*, 31, 1–9.
<https://doi.org/10.15244/pjoes/149259>

Punkty MNiSW / MEiN – 40; Impact Factor – 1.8

Mój wkład polegał na opracowaniu koncepcji badań fizjologicznych i planu badawczego wraz z kierownikiem projektu Panią dr hab. Małgorzatą Szultką-Młyńską, prof. UMK oraz Panem prof. dr. hab. Bogusławem Buszewskim. Pełniłam opiekę merytoryczną podczas prowadzenia badań fizjologicznych dotyczących analiz wzrostu roślin oraz analiz zawartości barwników fotosyntetycznych i fluorescencji chlorofilu. Podczas przygotowywania publikacji brałam udział w przygotowywaniu odpowiedzi na recenzje oraz przeprowadziłam edycję ostatecznej wersji publikacji.

Wyniki przedstawione w pracy **[H 1_3]** powstały w wyniku realizacji projektu badawczego OPUS 18 pt. „Nowe strategie otrzymywania związków bioaktywnych na bazie

krzemu”. Projekt, którego kierownikiem była Pani dr hab. Małgorzata Szultka-Młyńska, prof. UMK, realizowany był w konsorcjum z Wydziałem Chemii, Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu. Wydział Biologii i Biotechnologii, Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego był konsorcjantem w tym projekcie, a ja pełniłam funkcję koordynatora projektu ze strony UWM.

H 1_4 Głowacka, K., Pluskota, W. E., Najdzion, J., Okorski, A., Olszewski, J., & Lahuta, L. B. (2024). Cadmium-Induced Changes in the Accumulation of Sugars and the *PsGolS* Transcript in *Pisum sativum* L. *Applied Sciences-Basel*, 14, 1–20. <https://doi.org/10.3390/app14135486>

Punkty MNiSW / MEiN – 100; Impact Factor – 2.5 (2023)

Mój wkład polegał na sformułowaniu koncepcji badań (główny twórca koncepcji), wyborze metod i warunków eksperymentalnych. Przeprowadziłam szczegółową analizę dystrybucji skrobi w liściach oraz łodygach grochu (wykonaną metodą PAS). Przeanalizowałam wyniki dystrybucji niskocząsteczkowych cukrów w tkankach grochu. We współpracy z Panem prof. dr. hab. Adamem Okorskim wykonałam analizę statystyczną uzyskanych wyników. Przeprowadziłam interpretację wyników, sformułowałam wnioski oraz napisałam manuskrypt. Koordynowałam i przygotowałam odpowiedzi na recenzje oraz ostateczną wersję manuskryptu. Jestem autorem korespondencyjnym publikacji.

4.a.2 Omówienie pierwszego osiągnięcia naukowego

4.a.2.1 Zarys koncepcji i cele badań

Kadm (Cd) to pierwiastek, który zaliczamy do tzw. metali ciężkich. Choć termin „metale ciężkie” nie jest precyzyjny (Duffus 2002), to powszechnie używany jest do opisu metali lub półmetali (metalooidów), kojarzonych z zanieczyszczaniem środowiska i ich potencjalną toksycznością lub ekotoksycznością (Di Sanita` Toppi 1999; Duffus 2002). Zgodnie z jedną z definicji metalami ciężkimi są pierwiastki, których gęstość jest wyższa niż $5.0 \text{ g} \times \text{cm}^{-3}$. Oprócz kadmu są to m.in. chrom (Cr), rtęć (Hg), ołów (Pb), aluminium (Al) i srebro (Ag). Kadm, którego gęstość wynosi $8.6 \text{ g} \times \text{cm}^{-3}$, jest pierwiastkiem szeroko rozpowszechnionym w środowisku (Williams and Harrison 1986; Kabata-Pendias 2010). Został odkryty po raz pierwszy w 1817 r. przez niemieckiego chemika F. Stromeyera jako składnik rudy cynkowej smithsonitu (ZnCO_3). Występuje także w rudach ołowiu-cynku i ołowiu-miedzi-cynku, a jego stężenie jest zwykle związane z zawartością cynku. Jako czysty

metal (o niebieskawo-białym zabarwieniu) nie występuje w naturze, natomiast obecny jest w różnych ilościach jako naturalny składnik skał i gleb, występuje też w wodzie, powietrzu, tkankach roślinnych i zwierzęcych (Thornton 1986; Robards and Worsfold 1991). Antropogenicznym źródłem tego pierwiastka są elektrownie, systemy ciepłownicze, przemysł metalowy, spalarnie śmieci, ruch miejski, cementownie oraz nawozy fosforowe (Di Sanita` Toppi 1999). Rosnąca zawartość kadmu w glebach rolniczych, na skutek ich zanieczyszczenia, stanowi nie tylko poważne zagrożenie dla zdrowia, ale i produktywności upraw grochu. W Polsce, dla grupy gruntów II, do których należą m.in. grunty orne, sady, łąki i pastwiska, za dopuszczalny poziom Cd w glebie uznaje się zawartość w przedziale od 2 do 5 mg/kg suchej masy (Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 września 2016 r. w sprawie sposobu prowadzenia oceny zanieczyszczenia powierzchni ziemi).

Dane literaturowe dowodzą, że kadm jest efektywnie pobierany i gromadzony przez rośliny, co wpływa negatywnie na ich rozwój (Huybrechts et al. 2019). W wyniku zanieczyszczenia środowiska metalami ciężkimi niektóre gatunki roślin wykształciły strategie akumulacji i tolerancji tych pierwiastków, dzięki czemu odgrywają istotną rolę w bioremediacji (Baker and Brooks 1989). Fitoremediacja, będąca kategorią bioremediacji, korzysta z naturalnych zdolności niektórych roślin do pobierania i przetwarzania zanieczyszczeń. Wskaźniki takie jak współczynnik biokoncentracji (BCF, *ang. bioconcentration factor*) czyli stosunek stężenia metalu ciężkiego w określonych organach roślinnych np. korzeniach, do stężenia tego pierwiastka w glebie, oraz współczynnik translokacji (TF, *ang. translocation factor*) czyli stosunek stężenia metalu ciężkiego w pędzie do stężenia tego pierwiastka w korzeniu, są wykorzystywane do określania poziomu fitoremediacji (Pachura et al. 2016; Sharma et al. 2023).

Prowadzone przeze mnie badania, przedstawione jako pierwsze osiągnięcie habilitacyjne, zmierzały do poznania fizjologicznej odpowiedzi grochu siewnego (*Pisum sativum* L.) na kadm. Groch jest ważnym organizmem modelowym w genetyce, wykorzystywanym przez Grzegorza Mendla w jego eksperymentach założycielskich. Jest to roślina jednoroczna należąca do rodziny bobowatych (*Fabaceae*), dawniej motylkowych (*Papilionaceae*). Groch uprawia się na całym świecie w klimacie umiarkowanym, przy czym naturalnie występuje w Europie, północno-zachodniej Azji i wschodniej Afryce (Maxted and Ambrose 2001). Groch może być zaliczony do ważniejszych roślin użytkowych, ze względu na jego zróżnicowane wykorzystanie (m. in. warzywo, suche nasiona jako pokarm ludzi, pasza

sucha i zielona dla zwierząt) oraz szeroki zasięg uprawy. Nasiona grochu są bogate w białko (24-26% suchej masy), co czyni go ważnym alternatywnym źródłem białka dla światowego przemysłu spożywczego (Tulbek et al. 2017). Ponadto, groch może być potencjalną alternatywą dla soi, ponieważ ma podobne właściwości odżywcze i funkcjonalne, ale jest mniej alergizujący niż soja (Fischer et al. 2020). Oprócz białka, groch jest również źródłem węglowodanów (skrobi i niskocząsteczkowych cukrów, w tym oligosacharydów rodziny rafinozy), błonnika pokarmowego, minerałów, witamin i substancji fitochemicznych (Tulbek et al. 2017). Podobnie jak inne rośliny, z różnych taksonów, groch może gromadzić kadm w owocach, co stwarza poważne ryzyko przeniesienia kadmu w łańcuchu pokarmowym (Robards and Worsfold 1991; Gusmão Lima et al. 2006). O ile za bezpieczny dla człowieka maksymalny poziom zawartości kadmu w nasionach roślin strączkowych (w tym grochu) przyjęto 0,04 mg/kg świeżej masy, a dla zawartości kadmu w białku z tych nasion – 0,10 mg/kg (FAO/WHO 2001; UE 2021), to wpływ kadmu na fizjologię grochu oraz mechanizmy związane z ochroną roślin przed jego szkodliwym działaniem pozostają w większości nieznane.

Doniesienia literaturowe wskazują, że kadm może istotnie osłabiać wzrost roślin, w tym akumulację świeżej i suchej masy oraz drastycznie obniżać zawiązywanie i wypełnianie strąków i nasion (nawet o 85%, Galal et al. 2021). W reakcji grochu na kadm stwierdzono zakłócenia w efektywności fotosyntezy (Chugh and Sawhney 1999; Sandalio et al. 2001; Hattab et al. 2009), zmiany w ultrastrukturze chloroplastów (Sandalio et al. 2001), zaburzenia w rozwoju korzeni (Fusconi et al. 2006) oraz modulację aktywności systemu antyoksydacyjnego grochu (Dixit et al. 2001; Sandalio et al. 2001; Rodríguez-Serrano et al. 2006). U innych gatunków roślin zaobserwowano także tworzenie w korzeniach fizycznych barier w formie wzmocnienia ścian komórkowych (Lux et al. 2011) i inne zaburzenia rozwojowe takie jak zahamowanie elongacji korzeni i wzrostu pędu wywołane obecnością tego pierwiastka (Huybrechts et al. 2019). **Temat wpływu kadmu na rozwój i fizjologię roślin pozostaje wciąż aktualny, szczególnie ze względu na rosnące zanieczyszczenie środowiska kadmem, z jednej strony, a dążenie do zwiększenia odporności na ten pierwiastek roślin uprawnych, z drugiej. Dlatego też specjalnego znaczenia nabiera konieczność pełniejszego wyjaśnienia fizjologicznej odpowiedzi roślin na stres kadmowy.** To zagadnienie przyświecało prowadzonym przeze mnie badaniom, których głównym celem było określenie wpływu kadmu na:

- rozwój roślin,

- fazę jasną fotosyntezy i efektywność fotosyntezy,
- aktywność systemu antyoksydacyjnego,
- metabolizm węglowodanowy,
- zmiany ultrastrukturalne komórek korzeni oraz
- pobieranie innych pierwiastków.

4.a.2.2 *Opis osiągniętych wyników i ich znaczenia*

Jednym z kluczowych zagadnień związanych z wpływem kadmu na rośliny jest **identyfikacja organów, w których dochodzi do jego akumulacji**. Ta informacja jest niezbędna dla zrozumienia, **jak kadm wpływa na funkcjonowanie poszczególnych tkanek i organów**. Ponadto pozwala na określenie miejsc, gdzie zachodzą procesy detoksykacji oraz na identyfikację mechanizmów zaangażowanych w transport i magazynowanie kadmu w roślinie. Wyniki badań przedstawionych do oceny jednoznacznie dowiodły, że **kadm** aplikowany w formie CdSO_4 **jest gromadzony głównie w korzeniach grochu** (współczynnik translokacji < 1 [H 1_3, H 1_4]), a jego zawartość w tkankach **wzrasta wraz z rosnącym stężeniem roztworu** [H 1_1, H 1_4]. Co więcej **pobieranie kadmu przebiega stosunkowo szybko** – podczas pierwszego tygodnia ekspozycji roślin, kadm jest akumulowany w korzeniach w ok. 90% [H 1_1]. **Na ten proces wpływa także dostępność Cd** – w uprawie hydroponicznej [H 1_3] zanotowano wyższą akumulację Cd w korzeniach niż w doświadczeniu prowadzonym w perlicie, przy aplikacji siarczanu w takim samym stężeniu ($50 \mu\text{M CdSO}_4$ [H 1_4]). Ponadto, potwierdzono, że **negatywny wpływ kadmu na groch może wynikać z osłabienia pobierania innych pierwiastków – wapnia, manganu i potasu** [H 1_2], co dotychczas wykazano u innych gatunków roślin (Gonçalves et al. 2009; Carvalho Bertoli et al. 2012; Hédiji et al. 2015). Pierwiastki te są kluczowe dla m.in. w podziałów komórkowych (Ca), fotolizy wody (Mn) i gospodarki wodnej roślin (K). Kadm konkuruje z wapniem o transport przez kanały wapniowe (Perfus-Barbeoch et al. 2002), co prowadzi do spadku zawartości wapnia w roślinach narażonych na działanie kadmu. Obserwowane u grochu obniżenie stężenia wapnia, które było skorelowane z zastosowanym stężeniem kadmu [H 1_2], potwierdza wcześniejsze doniesienia literaturowe (Hédiji et al. 2015). **Jednocześnie wynik ten wskazuje, że negatywna zależność między zmianami zawartości wapnia i kadmu jest charakterystycznym efektem reakcji roślin na kadm.**

Profil akumulacji kadmu pozwala na sugestię, że groch można zaliczyć do tzw. roślin wykluczających (*ang. excluders*). Rośliny te charakteryzują się m. in. wytwarzaniem barier fizycznych lub chemicznych w korzeniach, które zapobiegają przemieszczaniu się metali ciężkich z korzeni do pędów (Lux et al. 2011). Faktycznie, w badaniach własnych potwierdzono obecność takich barier w postaci zwiększonej suberynizacji ścian komórkowych endodermy korzeni [H 1_1]. Zwiększoną liczbę lamelli suberynowych w ścianach komórkowych endodermy korzeni roślin grochu traktowanych 200 μ M CdSO₄ zanotowano już po tygodniu od traktowania roślin tym pierwiastkiem. Obecność suberyny w ścianach komórkowych zwiększa hydrofobowość ścian komórkowych, co w konsekwencji ogranicza transport wody i jonów w poprzek korzenia do wiązek przewodzących zlokalizowanych w walcu osiowym (Baxter et al. 2009). Prowadzi to do zmniejszonego transportu kadmu do pędów, gdyż kadm transportowany jest głównie przez ksylem (Lux et al. 2011; Huang et al. 2020). Wcześniejsze badania prowadzone na klonach z rodzaju *Salix* wykazały, że apoplastyczny ruch kadmu do walca osiowego oraz jego translokacja ku górze, mogą się różnić w zależności od budowy anatomicznej endodermy (Lux et al. 2004). Stwierdzono, że lamelle suberynowe były bardziej oddalone od wierzchołka wzrostu korzenia w klonach *Salix*, charakteryzujących się większą translokacją kadmu do pędu w porównaniu z klonami o niskiej translokacji. Ponadto, indukowaną przez kadm suberynizację ścian komórkowych endodermy oraz lignifikację ścian komórek perycyklu, wewnętrznych komórek kory oraz ektopowe odkładanie ligniny w świetle komórek protoksylemu obserwowano również u kukurydzy (Lux et al. 2011). Badania własne wykazały również najwyższą aktywność enzymu amoniakolizazy fenyloalaniny (PAL, *ang. phenylalanine ammonia-lyase*), pierwszego enzymu szlaku fenylopropanoidowego, determinującego syntezę związków fenolowych, m. in. ligniny oraz suberyny (Kolattukudy 1981), w korzeniach traktowanych właśnie 200 μ M CdSO₄, już po jednym dniu od podania kadmu [H 1_1]. Można zatem stwierdzić, że u grochu jednym z mechanizmów obronnych przed toksycznym stężeniem kadmu jest ograniczanie przemieszczania się tego pierwiastka, poprzez wzrost aktywności PAL oraz tworzenie bariery w postaci zwiększonego odkładania się suberyny w ścianach komórkowych endodermy [H 1_1].

Zwiększona akumulacja kadmu w korzeniach grochu może wpływać nie tylko na rozwój systemu korzeniowego i wzrost pędu, ale również na fizjologię całej rośliny, zakłócając procesy metaboliczne, gospodarkę wodną oraz zdolności do efektywnego przechodzenia przez

kolejne fazy rozwojowe. Negatywny wpływ Cd na kiełkowanie oraz wzrost wegetatywny był wielokrotnie badany u innych roślin (Liu et al. 2012; Możdżeń et al. 2016; Haider et al. 2021). Wykazano również, że ciągła ekspozycja *Arabidopsis thaliana* na kadm zmniejszała ich zdolność reprodukcyjną, jednak rośliny nadal były w stanie rosnąć, przetrwać oraz wytwarzać luszczyny zawierające zdolne do kiełkowania nasiona (Keunen et al. 2011). W badaniach własnych analizowano wpływ kadmu na czterotygodniowe rośliny grochu [H 1_1, H 1_2, H 1_4]. Badano zarówno cechy związane z rozwojem wegetatywnym, takie jak długość korzeni i pędów, jak i rozwojem generatywnym roślin, obejmujące m.in. czas kwitnienia, liczbę kwiatów i zawiązywanie nasion. Aby zbadać dynamikę zmian, pomiary wykonywano w 7., 14., 21. i 28. dniu po traktowaniu kadmem [H 1_2]. Istotne zmiany w długości korzeni i pędów zanotowano po 28 dniach ekspozycji. **Widocznym efektem działania kadmu było brązowienie korzeni, które może świadczyć o obumieraniu komórek.** Już po tygodniu traktowania roślin kadmem, w komórkach korzeni wykryto tzw. plastolisomy [H 1_1]. Plastolisomy, czyli autofagowe plastydy zostały po raz pierwszy opisane przez Nagla (1977) w wieszadelku zarodka fasoli. **Zaobserwowane w badaniach własnych plastolisomy [H 1_1], mogą być zaangażowane w degradację cytoplazmy podczas różnicowania komórek, ale z drugiej strony, ich obecność może też być związana ze stresem** zwłaszcza, że występowały one w komórkach walca osiowego korzeni roślin traktowanych 100 i 200 μM Cd. Procesy podobne do charakterystycznych dla makroautofagii, realizowane przez plastydy, były również sugerowane przez van Doorna i in. (2011) oraz Parę-Vegę i in. (2015). Filonova i in. (2000) sugerują, że struktury podobne do plastolisomów są prekursorami wakuol autolitycznych. Jak dotąd, **plastolisomów nie wykrywano w komórkach korzeni, co czyni własne odkrycia pierwszymi z tego zakresu. Obecność plastolisomów w komórkach korzeni może wskazywać na degradację cytoplazmy komórek lub potencjalnie na ich śmierć na drodze autofagii.**

Stres u roślin spowodowany obecnością metali ciężkich może prowadzić do zwiększonej produkcji reaktywnych form tlenu (ROS, *ang. reactive oxygen species*). ROS, takie jak nadutlenek wodoru (H_2O_2), anionorodnik ponadtlenkowy (O_2^-), rodnik hydroksylowy ($\text{OH}^\bullet$) i tlen singletowy ($^1\text{O}_2$) są szkodliwe dla funkcjonowania i metabolizmu komórek. W odpowiedzi na zwiększoną produkcję ROS aktywowane są u roślin skoordynowane systemy obrony antyoksydacyjnej (Panda et al. 2016). Choć kadm nie uczestniczy bezpośrednio w reakcjach redoks, to wpływa na produkcję i usuwanie ROS, np. poprzez zastępowanie metali,

biorących udział w reakcjach redoks w metaloproteinach lub poprzez obniżanie poziomu przeciwutleniaczy komórkowych (Cuypers et al. 2010; Panda et al. 2016). Stres oksydacyjny indukowany przez kadm jest kluczowym czynnikiem inicjującym różnorodne kaskady sygnałowe, niezbędne do długoterminowej aklimatyzacji i przetrwania roślin narażonych na działanie tego pierwiastka (Cuypers et al. 2023).

Ocenę stresu oksydacyjnego u grochu w odpowiedzi na kadm dokonano poprzez pomiary aktywności enzymów antyoksydacyjnych: katalazy (CAT, *ang. catalase*), peroksydazy gwajakolowej (GPX, *ang. guaiacol peroxidase*) i peroksydazy askorbinianowej (APX, *ang. ascorbate peroxidase*) po pierwszym, jak i siódmym dniu od ekspozycji roślin na kadm [H 1_1]. Wykazano, że **aktywność badanych enzymów antyoksydacyjnych w korzeniach roślin traktowanych kadmem spadała po aplikacji kadmu, niezależnie od zastosowanego stężenia CdSO₄**. Choć obniżenie aktywności enzymów antyoksydacyjnych pod wpływem kadmu zarówno w korzeniach, jak i w pędach u grochu uprawianego w warunkach hydroponicznych opisano wcześniej (Sandalio et al. 2001; Rodríguez-Serrano et al. 2006; Romero-Puertas et al. 2007), to taki efekt działania kadmu na aktywność enzymów antyoksydacyjnych u grochu nie jest powszechny (Dixit et al. 2001). Zarówno obserwacje prowadzone na grochu, ale przede wszystkim u innych roślin wskazują na odmienny mechanizm polegający na wzroście aktywności enzymów antyoksydacyjnych w odpowiedzi na stres kadmowy (Cuypers et al. 2010; Cuypers et al. 2023). Ponadto w przeprowadzonych badaniach własnych [H 1_1], zgodnie z doniesieniami opisującymi wpływ kadmu u grochu (Rodríguez-Serrano et al. 2006), **obserwowano charakterystyczne gromadzenie nadtlenku wodoru w korzeniach tych roślin. Szczególnie duże ilości H₂O₂ występowały w komórkach ryzodermy, a po tygodniu traktowania również w endodermie roślin traktowanych solą kadmu w najwyższym stężeniu (200 μM CdSO₄)**. Sugeruje się, że nadtlenek wodoru ma istotne znaczenie w polimeryzacji związków fenolowych podczas biosyntezy suberyny, podobnie jak w procesie lignifikacji (Vishwanath et al. 2015). **Obecność nadtlenku wodoru w komórkach endodermy, których ściany uległy suberynizacji indukowanej przez kadm, może potwierdzać tę hipotezę.**

Odpowiedź stresowa związana z akumulacją kadmu w korzeniach ma istotny wpływ na rozwój systemu korzeniowego oraz pędu. Interesującym efektem długiej ekspozycji grochu na kadm oprócz brązowienia korzeni było **wydłużenie korzenia głównego oraz osłabienie wzrostu korzeni bocznych** [H 1_2]. Zahamowanie rozwoju korzeni bocznych wydaje się być

charakterystycznym efektem działania kadmu nie tylko u grochu (Rodríguez-Serrano et al. 2006), ale też u innych roślin (Xie et al. 2019; Wang et al. 2021). Zaburzony rozwój systemu korzeniowego może prowadzić do ograniczenia zdolności roślin do efektywnego pobierania wody i składników odżywczych i wpływać na ogólną kondycję fizjologiczną rośliny. Wyniki badań własnych potwierdziły, że **ekspozycja roślin na kadm negatywnie wpływa na gospodarkę wodną rośliny [H 1_1, H 1_2, H 1_3]**. Zaobserwowano istotnie niższą zawartość wody zarówno w korzeniach, jak i w pędach roślin poddanych działaniu kadmu. Stosunek zawartości wody w pędach do zawartości wody w korzeniach był jednak **taki sam jak w przypadku roślin kontrolnych [H 1_2]**. Podobnie, wysokość współczynnika tolerancji (TI, *ang. tolerance index* stosunek suchej masy roślin traktowanych kadmem do suchej masy roślin kontrolnych $\times 100\%$), który wynosi od 93 do 103% może pośrednio wskazywać na ten efekt [H 1_4]. Wydaje się, że **jednym z mechanizmów ochrony komórek przed obniżoną zawartością wody w tkankach może być akumulacja sacharozy w celu utrzymania równowagi osmotycznej w uszkodzonych komórkach i ochrony rośliny przed stresem wywołanym kadmem [H 1_4]**.

Analiza długości pędów roślin traktowanych kadmem nie wykazała istotnych zmian, w porównaniu do roślin kontrolnych niezależnie od typu prowadzenia uprawy [H 1_2, H 1_3]. Szczegółowa analiza wzrostu roślin uprawianych w perlicie wykazała, że u **roślin traktowanych kadmem stosunek długości korzenia głównego do długości pędu oraz stosunek liczby międzywęźli do długości pędu były wyższe [H 1_2]**, co wskazuje na zachwianie proporcji między tymi organami. Zwiększona ilość międzywęźli świadczy o zmianach w różnicowaniu merystemu wierzchołkowego pędu zachodzących pod wpływem kadmu, co może wpływać na przejście rośliny z fazy wzrostu wegetatywnego do fazy wzrostu generatywnego, czyli na indukcję kwitnienia [H 1_2]. Kwitnienie to kluczowy etap w życiu rośliny, który ma znaczenie dla skutecznej reprodukcji, w tym dla tworzenia nasion i owoców (Simpson and Dean 2002). Proces ten może być indukowany przez czynniki autonomiczne lub środowiskowe, takie jak światło czy temperatura. Dane literaturowe wskazują, że kwitnienie może być również regulowane przez czynniki stresowe, pod wpływem których obserwowano zarówno zahamowanie lub opóźnienie kwitnienia, jak też jego przyspieszenie (Takeno 2016). Wyniki badań własnych potwierdziły wpływ kadmu na czas kwitnienia, ilość zawiązywanych kwiatów oraz produkcję nasion. Głównym efektem działania kadmu było opóźnienie kwitnienia [H 1_2]. Opóźnienie czasu kwitnienia

spowodowane działaniem kadmu obserwowano również u innych roślin (Nowak 2007). Jednak mimo opóźnienia kwitnienia, rośliny w trzecim tygodniu po traktowaniu kadmem w stężeniu powyżej 10 μM Cd, wytwarzały więcej kwiatów niż rośliny kontrolne. **Zjawisko to można zakwalifikować jako tzw. kwitnienie wywołane stresem (ang. *Stress-induced flowering*) (Takeno 2016).** Podobny efekt działania kadmu wykazano u *Arabidopsis* (Wang et al. 2012). Choć kwitnienie indukowane kadmem mogłoby być traktowane jako przejaw mechanizmu adaptacyjnego, to szybkie zamieranie zawiązywanych strąków nie pozwala na potwierdzenie tej hipotezy. Tylko rośliny traktowane kadmem w najniższym z testowanych stężeń (10 μM CdSO₄) wytwarzały podobną ilość morfologicznie dojrzałych nasion co rośliny kontrolne. Ponieważ kadm powodował zaburzenia zarówno w rozwoju wegetatywnym, jak i generatywnym grochu, pojawiła się hipoteza, że zaobserwowane zmiany, mogły być wynikiem zakłóceń w wytwarzaniu i dystrybucji głównych fotosyntezujących. W związku z tym przeprowadzono analizy efektywności procesu fotosyntezy [H 1_2, 1_3], dystrybucji skrobi w liściach i łodygach grochu oraz składu i zawartości cukrowców rozpuszczalnych [H 1_4].

Wpływ kadmu na wybrane parametry opisujące efektywność fotosyntezy u grochu badano po 1, 7 i 28 dniach od traktowania roślin kadmem [H 1_2 i H 1_3]. Analizowano zmiany: stężenia barwników fotosyntetycznych, maksymalnej wydajności kwantowej (F_v/F_m) fotosystemu II, czy też intensywności fluorescencji chlorofilu *a* mierzonej przy długości fali 690 nm i 735 nm. Zarówno zawartość chlorofilu i karotenoidów, jak i właściwości fluorescencyjne fotosystemów (F_{690}/F_{735}) są ważnymi parametrami stosowanymi dla opisu stresu u roślin (Lichtenthaler and Rinderle 1988; Lichtenthaler et al. 2005; Maurya et al. 2008; Ci et al. 2009; Liu et al. 2014). Uzyskane wyniki prowadzone na grochu uprawianym w warunkach hydroponicznych wykazały niewielki spadek stężenia barwników fotosyntetycznych oraz brak istotnego wpływu kadmu na maksymalną wydajność kwantową (F_v/F_m) fotosystemu II [H 1_3]. **Może to wskazywać, że kadm stosowany w naszych doświadczeniach nie prowadził do znaczącej degradacji barwników fotosyntetycznych i zmniejszenia wydajności fotosystemów.**

Ciekawych wyników dostarczyła analiza wymiany gazowej u grochu, czyli tempa fotosyntezy (ang. *photosynthesis rate*) oraz tempa transpiracji (ang. *transpiration rate*), pod wpływem kadmu [H 1_2]. **Zwiększenie tempa fotosyntezy** określonego poprzez pomiar ilości dwutlenku węgla pochłanianego na jednostkę powierzchni liścia **zaobserwowano po**

pierwszym dniu traktowania roślin kadmem, natomiast w 7 i 28 dniu od zastosowania kadmu, nastąpił spadek tempa fotosyntezy oraz tempa transpiracji. To oznacza, że wpływ kadmu na fizjologię roślin może się ujawniać ze znacznym opóźnieniem, co należy brać pod uwagę przy planowaniu terminu wykonywania analiz tempa fotosyntezy, czy też tempa transpiracji.

Istotnym procesem dla funkcjonowania roślin w stresie wywołanym kadmem jest regulacja wymiany gazowej liści poprzez zmianę apertury aparatów szparkowych – ich zamykanie się pod wpływem kadmu opisano dotychczas zarówno u grochu (Sandalio et al. 2001), ale też u innych gatunków roślin (Perfus-Barbeoch et al. 2002). **W badaniach własnych wykazano, że otwieranie/zamykanie aparatów szparkowych u grochu zależy od stężenia kadmu [H 1_2].** Zwiększoną liczebność otwartych aparatów szparkowych obserwowano głównie po 1 dniu, ale także po 7 dniu od traktowania, jeśli aplikowano kadm w stężeniu 10 lub 50 μM CdSO_4 . Z kolei zamykanie aparatów szparkowych zanotowano po zastosowaniu wyższych stężeń kadmu (100 i 200 μM CdSO_4). U *Arabidopsis* wykazano, że w zależności od użytej dawki kadm ogranicza przewodnictwo liści, przy czym spadek ten może być spowodowany bezpośrednio poprzez zamknięcie aparatów szparkowych (Perfus-Barbeoch et al. 2002), a w siewkach *Sassafras* kadm, zależnie od dawki, wpływał na efektywności fotosyntezy (Zhao et al. 2021). **Wyniki badań własnych wskazują, że odpowiedź roślin grochu na stres wywołany przez kadm zależy również od stężenia kadmu, kiedy to niższe dawki indukują określone procesy, a wyższe wywołują reakcje stresowe, w tym np. zamykanie aparatów szparkowych. Zatem kadm, zależnie od dawki, wpływa na otwieranie/zamykanie aparatów szparkowych, co w konsekwencji może ograniczać wymianę gazową i redukować tempo fotosyntezy. Co więcej, częstość otwarcia aparatów szparkowych była również skorelowana z tempem transpiracji oraz stosunkiem intensywności fluorescencji chlorofilu *a* (F690/F735) [H 1_2].**

Jednym z pośrednich produktów fotosyntezy jest skrobia, która może być przejściowo gromadzona w stromie chloroplastów. Skrobia ta, najczęściej jest rozkładana w nocy a produkty jej rozkładu, przekształcone w cytoplazmie do sacharozy, są transportowane do miejsc, gdzie są wykorzystywane jako źródło węgla i energii w procesach metabolicznych (Ciereszko 2018; Dong and Beckles 2019). Zmiany w ilości i lokalizacji skrobi w liściach oraz łodygach grochu pod wpływem kadmu przeanalizowano po 7 i 28 dniach od traktowania [H 1_4]. Uzyskane wyniki potwierdziły wcześniejsze doniesienia o indukowanej przez kadm akumulacji skrobi w

tkankach roślin (Rai et al. 2005; Sree and Appenroth 2014; Higuchi et al. 2015; Biswas and Pal 2022). **Zauważono różnice we wzorze gromadzenia skrobi w łodygach pomiędzy roślinami kontrolnymi a roślinami traktowanymi kadmem po 4 tygodniach ekspozycji na ten pierwiastek [H 1_4].** Charakterystyczne nagromadzenie skrobi w łodygach roślin traktowanych 50 i 200 μM CdSO_4 może sugerować zaburzenie translokacji węgla z łodyg do rozwijających się kwiatów, a następnie do owoców. To zaburzenie może wyjaśniać obserwowane zahamowanie rozwoju nasion u tych roślin [H 1_2].

Efektom ekspozycji roślin na kadm były również znaczące różnice w dystrybucji rozpuszczalnych węglowodanów [H 1_4]. Zagadnienie znaczenia/udziału cukrów w regulacji procesów rozwojowych jest wciąż przedmiotem rozległych badań (Corbesier et al. 1998; Ohto et al. 2001; Cho et al. 2018; Li et al. 2020). Wcześniejsze badania wykazały, że kadm może wywoływać wzrost poziomu węglowodanów rozpuszczalnych (Azizollahi et al. 2019; Li et al. 2020) lub przeciwnie - ich spadek (Shukla et al. 2003; Marzban et al. 2017). W badaniach własnych [H 1_4] w roślinach kontrolnych i poddanych działaniu 10 μM CdSO_4 , zawartość niskocząsteczkowych cukrów zmalała, podczas gdy w roślinach traktowanych wyższymi stężeniami kadmu zanotowano wzrost zawartości sacharozy, przy niezmiennym stężeniu fruktozy, glukozy, myo-inozytolu i maltozy. Podsumowując uzyskane wyniki można stwierdzić, że **gromadzenie cukrów (zarówno niskocząsteczkowych, jak i skrobi) w tkankach korzeni i pędów grochu może być spowodowane alokacją energii, kiedy to rośliny priorytetowo przekazują energię na mechanizmy odpowiedzi na stres, a nie na procesy reprodukcyjne (Ciereszko 2018).**

Interesującym wynikiem badań własnych było **wykrycie galaktinolu i rafinozy w tkankach grochu po 7 dniach od aplikacji kadmu [H 1_4].** Gromadzenie rafinozy pod wpływem kadmu zostało po raz pierwszy opisane u łubinu białego, w warunkach uprawy *in vitro* (Costa and Spitz 1997). Z kolei Sun i in. (2010) zaobserwowali zwiększony poziom rafinozy po ekspozycji na kadm u dwutygodniowych siewek *Arabidopsis thaliana*. U grochu przeprowadzono dodatkowo analizy poziomu transkryptów syntazy galaktinolu (*PsGolS*, ang. *Pisum sativum Galactinol Syntase*) oraz syntazy rafinozy (*PsRS*, ang. *Pisum sativum Raffinose Syntase*), które wykazały, że **ekspresja *PsGolS* jest indukowana przez kadm [H 1_4].** Podobne rezultaty odnotowano również dla ryżu (Oono et al. 2014). **Wyniki te dowodzą, że u grochu ważną rolę w odpowiedzi na stres spowodowany kadmem pełni szlak oligosacharydów rodziny rafinozy, typowy dla nasion grochu (Górecki et al. 2000;**

Gawłowska et al. 2014; Gawłowska et al. 2017) indukowany też przez stres osmotyczny (Lahuta and Górecki 2011; Pluskota et al. 2015) lub desykcję (Cacela and Hinch 2006; Lahuta et al. 2014; Sengupta et al. 2015; Sanyal et al. 2023). Ochronne działanie galaktinolu może polegać na neutralizacji reaktywnych form tlenu (Nishizawa et al. 2008; Nishizawa-Yokoi et al. 2008). Wyniki badań na transgenicznym liniach *Arabidopsis* z genem *CaGolS*, potwierdziły gromadzenie mniejszych ilości ROS i podwyższoną odporność roślin na różne abiotyczne czynniki stresowe (Salvi et al. 2018). Rafinozie przypisywana jest inna ochronna rola – polegająca na stabilizacji struktur błon biologicznych (poprzez zastępowanie molekuł wody) i zapobieganiu wyciekowi wody z komórek podczas odwodnienia (Cacela and Hinch 2006). Dodatkowo, nagromadzenie rafinozy w chloroplastach pod wpływem chłodu umożliwia ochronę struktury tylakoidów i stabilizację fotosystemu II (Schneider and Keller 2009; Knaupp et al. 2011).

4.a.2.3 Podsumowanie pierwszego osiągnięcia habilitacyjnego

Najważniejszym osiągnięciem naukowym jest charakterystyka fizjologicznej odpowiedzi grochu na stres kadmowy, w tym wykazanie, że:

- **głównym miejscem akumulacji kadmu u grochu są korzenie roślin [H 1_3, H 1_4]**, co potwierdza niski współczynnik translokacji kadmu (<1); sugeruje to występowanie mechanizmów odpowiedzialnych za wiązanie tego pierwiastka lub ograniczenie jego mobilności do pędów, prawdopodobnie **na skutek obserwowanej suberynizacji ścian komórek endodermy [H 1_1]**;
- **zmniejszona akumulacja Mn, K i zwłaszcza Ca w roślinach po traktowaniu kadmem może być jednym z charakterystycznych efektów wpływu kadmu na rośliny [H 1_2]** i pozwala sugerować, że efekty działania tego pierwiastka na rośliny mogą być skutkiem również niedoboru tych pierwiastków;
- **kadm wywołuje zmiany w odpowiedzi oksydacyjnej** obserwowane jako spadek aktywności enzymów antyoksydacyjnych (katalazy, peroksydazy gwajakolowej i peroksydazy askorbinianowej) oraz gromadzenie nadtlenku wodoru (H_2O_2), zwłaszcza w komórkach ryzodermy i endodermy. H_2O_2 może uczestniczyć w procesach polimeryzacji związków fenolowych, co wspiera biosyntezę suberyny [H 1_1];
- **istotny wpływ na rozwój wegetatywny roślin ma dawka i czas ekspozycji roślin na kadm**: do skracania międzywęzła oraz hamowania rozwoju korzeni bocznych dochodzi u

roślin traktowanych tylko wyższymi dawkami kadmu, natomiast niższe dawki nie powodują widocznych zmian [H 1_2];

- **odkrycie plastolisomów (plastydy autofagowe) w komórkach korzeni grochu**, może świadczyć o degradacji cytoplazmy lub aktywacji procesów autofagii pod wpływem stresu kadmowego [H 1_1];
- **wpływ kadmu na rozwój generatywny grochu zależy od stężenia kadmu i zmienia się w czasie traktowania** – o ile po pierwszym tygodniu od traktowania roślin kadmem w podwyższonych stężeniach zaobserwowano zahamowanie kwitnienia, to po kolejnych tygodniach obserwowano indukowane stresem kwitnienie tych roślin. Jednak proces ten nie był zakończony skutecznym dojrzewaniem strąków i nasion [H 1_2];
- **wpływ kadmu na wymianę gazową grochu zmienia się z indukcji na hamowanie, odpowiednio po krótkim i dłuższym czasie traktowania** [H 1_2];
- **węglowodany pełnią zasadniczą rolę w mechanizmach obronnych roślin w reakcji na toksyczne działanie kadmu** [H 1_4]. Kadm wpływa na alokację zasobów i dostawę cukrów do kwiatów i owoców, tym samym wpływając na rozwój i plon nasion [H 1_4, H 1_2];
- **indukowana działaniem kadmu ekspresja *PsGolS*** potwierdza, że akumulacja galaktinolu i rafinozy może mieć wpływ na zwiększenie tolerancji roślin na stres kadmowy u grochu [H 1_4].

4.a.2.4 Plany dalszych badań

W najbliższym czasie planuję przeprowadzenie badań nad rolą fitohormonów, głównie auksyn, w odpowiedzi roślin na stres kadmowy. Temat ten jest interesujący szczególnie ze względu na zaobserwowane zmiany w rozwoju pędu, takie jak skrócenie międzywęzli oraz zahamowanie rozwoju korzeni bocznych u grochu. Wcześniejsze badania wskazują, że stres kadmowy prowadzi do obniżenia poziomu endogennych auksyn (Hu et al. 2013; Yue et al. 2016; Zhan et al. 2017; Chen et al. 2024). Natomiast podanie egzogennych auksyn może łagodzić skutki stresu kadmowego. W ostatnich latach wykazano zmniejszenie stężenia kadmu w pędach, poprzez zwiększenie wiązania kadmu w korzeniach *Arabidopsis* (Zhu et al. 2013), a także wspomaganie wzrostu korzeni pomidora poprzez aktywację ekspresji genów związanych z reakcjami obronnymi (Guan et al. 2022).

4.a.2.5 Literatura

- Azizollahi Z, Ghaderian SM, Ghotbi-Ravandi AA (2019) Cadmium accumulation and its effects on physiological and biochemical characters of summer savory (*Satureja hortensis* L.). *Int J Phytoremediation* 21:1241–1253. <https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1619163>
- Baker A, Brooks R (1989) Terrestrial Higher Plants Which Hyperaccumulate Metallic Elements, A Review of Their Distribution, *E. Ecol. Phytochem. Biorecovery* 1
- Baxter I, Hosmani PS, Rus A, Lahner B, Borevitz JO, Muthukumar B, Mickelbart MV, Schreiber L, Franke RB, Salt DE (2009) Root suberin forms an extracellular barrier that affects water relations and mineral nutrition in *Arabidopsis*. *PLoS Genet* 5:e1000492. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1000492>
- Biswas A, Pal S (2022) Comparative screening of cadmium stress responses among three rice cultivars. *EEB* 20:179–192. <https://doi.org/10.22364/eeb.20.17>
- Cacela C, Hinch DK (2006) Monosaccharide composition, chain length and linkage type influence the interactions of oligosaccharides with dry phosphatidylcholine membranes. *Biochim Biophys Acta* 1758:680–691. <https://doi.org/10.1016/j.bbamem.2006.04.005>
- Carvalho Bertoli A, Gabriel Cannata M, Carvalho R, Ribeiro Bastos AR, Puggina Freitas M, dos Santos Augusto A (2012) *Lycopersicon esculentum* submitted to Cd-stressful conditions in nutrition solution: Nutrient contents and translocation. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 86:176–181. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.09.011>
- Chen J, Huang SB, Wang X, Huang L, Gao C, Huang X-Y, Zhao F-J (2024) IAR4 mutation enhances cadmium toxicity by disturbing auxin homeostasis in *Arabidopsis thaliana*. *J Exp Bot* 75:438–453. <https://doi.org/10.1093/jxb/erad366>
- Cho L-H, Pasriga R, Yoon J, Jeon J-S, An G (2018) Roles of Sugars in Controlling Flowering Time. *J. Plant Biol.* 61:121–130. <https://doi.org/10.1007/s12374-018-0081-z>
- Chugh LK, Sawhney SK (1999) Photosynthetic activities of *Pisum sativum* seedlings grown in presence of cadmium. *Plant Physiology and Biochemistry* 37:297–303. [https://doi.org/10.1016/S0981-9428\(99\)80028-X](https://doi.org/10.1016/S0981-9428(99)80028-X)
- Ci D, Jiang D, Dai T, Jing Q, Cao W (2009) Effects of cadmium on plant growth and physiological traits in contrast wheat recombinant inbred lines differing in cadmium tolerance. *Chemosphere* 77:1620–1625. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.08.062>
- Ciereszko I (2018) Regulatory roles of sugars in plant growth and development. *Acta Soc Bot Pol* 87. <https://doi.org/10.5586/asbp.3583>
- Corbesier L, Lejeune P, Bernier G (1998) The role of carbohydrates in the induction of flowering in *Arabidopsis thaliana*: comparison between the wild type and a starchless mutant. *Planta* 206:131–137. <https://doi.org/10.1007/s004250050383>
- Costa G, Spitz E (1997) Influence of cadmium on soluble carbohydrates, free amino acids, protein content of in vitro cultured *Lupinus albus*. *Plant Science* 128:131–140. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(97\)00148-9](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(97)00148-9)

- Cuypers A, Plusquin M, Remans T, Jozefczak M, Keunen E, Gielen H, Opdenakker K, Nair AR, Munters E, Artois TJ, Nawrot T, Vangronsveld J, Smeets K (2010) Cadmium stress: an oxidative challenge. *Biometals* 23:927–940. <https://doi.org/10.1007/s10534-010-9329-x>
- Cuypers A, Vanbuel I, Iven V, Kunnen K, Vandionant S, Huybrechts M, Hendrix S (2023) Cadmium-induced oxidative stress responses and acclimation in plants require fine-tuning of redox biology at subcellular level. *Free Radic Biol Med* 199:81–96. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2023.02.010>
- Di Sanita` Toppi L (1999) Response to cadmium in higher plants. *Environmental and Experimental Botany*:105–130
- Dixit V, Pandey V, Shyam R (2001) Differential antioxidative responses to cadmium in roots and leaves of pea (*Pisum sativum* L. cv. Azad). *J Exp Bot* 52:1101–1109. <https://doi.org/10.1093/JEXBOT/52.358.1101>
- Dong S, Beckles DM (2019) Dynamic changes in the starch-sugar interconversion within plant source and sink tissues promote a better abiotic stress response. *Journal of Plant Physiology* 234-235:80–93. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2019.01.007>
- Duffus JH (2002) "Heavy metals" a meaningless term? (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry* 74:793–807. <https://doi.org/10.1351/pac200274050793>
- FAO/WHO (2001) JOINT FAO/WHO FOOD STANDARDS PROGRAMME: Comments on the Draft Guideline Level and Proposed Draft Maximum Levels for Cadmium (Agenda Item 16d). <https://www.fao.org/4/X7137E/x7137e20.htm>
- Filonova LH, Bozhkov PV, Brukhin VB, Daniel G, Zhivotovsky B, Arnold S von (2000) Two waves of programmed cell death occur during formation and development of somatic embryos in the gymnosperm, Norway spruce. *J Cell Sci* 113 Pt 24:4399–4411. <https://doi.org/10.1242/jcs.113.24.4399>
- Fischer E, Cachon R, Cayot N (2020) *Pisum sativum* vs *Glycine max*, a comparative review of nutritional, physicochemical, and sensory properties for food uses. *Trends in Food Science & Technology* 95:196–204. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.11.021>
- Fusconi A, Repetto O, Bona E, Massa N, Gallo C, Dumas-Gaudot E, Berta G (2006) Effects of cadmium on meristem activity and nucleus ploidy in roots of *Pisum sativum* L. cv. Frisson seedlings. *Environmental and Experimental Botany* 58:253–260. <https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2005.09.008>
- Galal TM, Hassan LM, Ahmed DA, Alamri SAM, Alrumman SA, Eid EM (2021) Heavy metals uptake by the global economic crop (*Pisum sativum* L.) grown in contaminated soils and its associated health risks. *PLoS One* 16:e0252229. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252229>
- Gawłowska M, Lahuta L, Święcicki W, Krajewski P (2014) Variability in the oligosaccharide concentration in seeds of the mapping population of pea (*Pisum sativum* L.). *Czech J. Genet. Plant Breed.* 50:157–162. <https://doi.org/10.17221/116/2013-CJGPB>
- Gawłowska M, Święcicki W, Lahuta L, Kaczmarek Z (2017) Raffinose family oligosaccharides in seeds of *Pisum* wild taxa, type lines for seed genes, domesticated and advanced breeding materials. *Genet Resour Crop Evol* 64:569–578. <https://doi.org/10.1007/s10722-016-0384-1>

- Gonçalves JF, Antes FG, Maldaner J, Pereira LB, Tabaldi LA, Rauber R, Rossato LV, Bisognin DA, Dressler VL, Flores EMdM, Nicoloso FT (2009) Cadmium and mineral nutrient accumulation in potato plantlets grown under cadmium stress in two different experimental culture conditions. *Plant Physiol Biochem* 47:814–821. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2009.04.002>
- Górecki R, Lahuta L, Hedley C, Jones A (2000) Soluble sugars in maturing pea seeds of different lines in relation to desiccation tolerance. In: Black M, Bradford K, Vasquez-Ramos. J (eds) *Seed biology: advances and applications: Proceedings of the sixth international workshop on seeds*, Merida, Mexico. CAB International, Wallingford, UK, pp 67–74
- Guan X, Sui C, Luo K, Chen Z, Feng C, Dong X, Zeng B, Dong X, Liu X (2022) Effects of α -Naphthylacetic Acid on Cadmium Stress and Related Factors of Tomato by Regulation of Gene Expression. *Agronomy* 12:2141. <https://doi.org/10.3390/agronomy12092141>
- Gusmão Lima AI, Pereira SIA, Almeida Figueira EM de, Caldeira GCN, Caldeira HDQ (2006) Cadmium Uptake in PEA Plants Under Environmentally-Relevant Exposures: The Risk of Food-Chain Transfer. *Journal of Plant Nutrition* 29:2165–2177. <https://doi.org/10.1080/01904160600972837>
- Haider FU, Liqun C, Coulter JA, Cheema SA, Wu J, Zhang R, Wenjun M, Farooq M (2021) Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 211:111887. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111887>
- Hattab S, Dridi B, Chouba L, Ben KM, Bousetta H (2009) Photosynthesis and growth responses of pea *Pisum sativum* L. under heavy metals stress. *J Environ Sci (China)* 21:1552–1556. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)62454-7](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)62454-7)
- Hédiji H, Djebali W, Belkadhi A, Cabasson C, Moing A, Rolin D, Brouquisse R, Gallusci P, Chaïbi W (2015) Impact of long-term cadmium exposure on mineral content of *Solanum lycopersicum* plants: Consequences on fruit production. *South African Journal of Botany* 97:176–181. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2015.01.010>
- Higuchi K, Kanai M, Tsuchiya M, Ishii H, Shibuya N, Fujita N, Nakamura Y, Suzui N, Fujimaki S, Miwa E (2015) Common reed accumulates starch in its stem by metabolic adaptation under Cd stress conditions. *Front Plant Sci* 6:138. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00138>
- Hu YF, Zhou G, Na XF, Yang L, Nan WB, Liu X, Zhang YQ, Li JL, Bi YR (2013) Cadmium interferes with maintenance of auxin homeostasis in *Arabidopsis* seedlings. *Journal of Plant Physiology* 170:965–975. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.02.008>
- Huang X, Duan S, Wu Q, Yu M, Shabala S (2020) Reducing Cadmium Accumulation in Plants: Structure-Function Relations and Tissue-Specific Operation of Transporters in the Spotlight. *Plants (Basel)* 9. <https://doi.org/10.3390/plants9020223>
- Huybrechts M, Cuypers A, Deckers J, Iven V, Vandionant S, Jozefczak M, Hendrix S (2019) Cadmium and Plant Development: An Agony from Seed to Seed. *International Journal of Molecular Sciences* 20. <https://doi.org/10.3390/ijms20163971>
- Kabata-Pendias A (2010) *Trace Elements in Soils and Plants*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10158>
- Keunen E, Truyens S, Bruckers L, Remans T, Vangronsveld J, Cuypers A (2011) Survival of Cd-exposed *Arabidopsis thaliana*: Are these plants reproductively challenged? *Plant Physiol Biochem* 49:1084–1091. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2011.07.013>

- Knaupp M, Mishra KB, Nedbal L, Heyer AG (2011) Evidence for a role of raffinose in stabilizing photosystem II during freeze-thaw cycles. *Planta* 234:477–486. <https://doi.org/10.1007/s00425-011-1413-0>
- Kolattukudy PE (1981) Structure, Biosynthesis, and Biodegradation of Cutin and Suberin. *Annu. Rev. Plant. Physiol.* 32:539–567. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.32.060181.002543>
- Lahuta LB, Górecki RJ (2011) Raffinose in seedlings of winter vetch (*Vicia villosa* Roth.) under osmotic stress and followed by recovery. *Acta Physiol Plant* 33:725–733. <https://doi.org/10.1007/s11738-010-0597-4>
- Lahuta LB, Pluskota WE, Stelmaszewska J, Szablińska J (2014) Dehydration induces expression of *GALACTINOL SYNTHASE* and *RAFFINOSE SYNTHASE* in seedlings of pea (*Pisum sativum* L.). *Journal of Plant Physiology* 171:1306–1314. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2014.04.012>
- Li C, Liu Y, Tian J, Zhu Y, Fan J (2020) Changes in sucrose metabolism in maize varieties with different cadmium sensitivities under cadmium stress. *PLoS One* 15:e0243835. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0243835>
- Lichtenthaler U, Rinderle HK (1988) The Chlorophyll Fluorescence Ratio F690/F735 as a Possible Stress Indicator. In: Lichtenthaler HK (ed) *Applications of Chlorophyll Fluorescence in Photosynthesis Research, Stress Physiology, Hydrobiology and Remote Sensing*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp 189–196
- Lichtenthaler HK, Buschmann C, Knapp M (2005) How to correctly determine the different chlorophyll fluorescence parameters and the chlorophyll fluorescence decrease ratio RFd of leaves with the PAM fluorometer. *Photosynthetica* 43:379–393
- Liu S, Yang C, Xie W, Xia C, Fan P (2012) The Effects of Cadmium on Germination and Seedling Growth of *Suaeda salsa*. *Procedia Environmental Sciences* 16:293–298. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.041>
- Liu L, Sun H, Chen J, Zhang Y, Li D, Li C (2014) Effects of cadmium (Cd) on growth, chlorophyll content, and photosynthesis of cotton seedlings. *POJ*:284–290
- Lux A, Sottníková A, Opatrná J, Greger M (2004) Differences in structure of adventitious roots in *Salix* clones with contrasting characteristics of cadmium accumulation and sensitivity. *Physiol. Plant.* 120:537–545. <https://doi.org/10.1111/j.0031-9317.2004.0275.x>
- Lux A, Martinka M, Vaculík M, White PJ (2011) Root responses to cadmium in the rhizosphere: a review. *J Exp Bot* 62:21–37. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq281>
- Marzban L, Akhzari D, Ariapour A, Mohammadparast B, Pessarakli M (2017) Effects of cadmium stress on seedlings of various rangeland plant species (*Avena fatua* L., *Lathyrus sativus* L., and *Lolium temulentum* L.): Growth, physiological traits, and cadmium accumulation. *Journal of Plant Nutrition* 40:2127–2137. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1269347>
- Maurya R, Prasad SM, Gopal R (2008) LIF technique offers the potential for the detection of cadmium-induced alteration in photosynthetic activities of *Zea Mays* L. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews* 9:29–35. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2008.03.001>

- Maxted N, Ambrose M (2001) Peas (*Pisum* L.). In: Summerfield RJ, Maxted N, Bennett SJ (eds) Plant Genetic Resources of Legumes in the Mediterranean, vol 39. Springer Netherlands, Dordrecht, pp 181–190. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9823-1_10
- Możdżeń K, Zagata P, Migdałek G, Rut G, Rzepka A (2016) Effect of cadmium nitrate on morphological parameters of *Lupinus luteus* L. and *L. angustifolius* L. Modern Phytomorphology 7. <https://doi.org/10.5281/zenodo.160365>
- Nagl W (1977) «Plastolysomes» — Plastids Involved in the Autolysis of the Embryo-Suspensor in Phaseolus. Zeitschrift für Pflanzenphysiologie 85:45–51. [https://doi.org/10.1016/S0044-328X\(77\)80263-8](https://doi.org/10.1016/S0044-328X(77)80263-8)
- Nishizawa A, Yabuta Y, Shigeoka S (2008) Galactinol and Raffinose Constitute a Novel Function to Protect Plants from Oxidative Damage. PLANT PHYSIOLOGY 147:1251–1263. <https://doi.org/10.1104/pp.108.122465>
- Nishizawa-Yokoi A, Yabuta Y, Shigeoka S (2008) The contribution of carbohydrates including raffinose family oligosaccharides and sugar alcohols to protection of plant cells from oxidative damage. Plant Signaling & Behavior 3:1016–1018. <https://doi.org/10.4161/psb.6738>
- Nowak J (2007) Effects of cadmium and lead concentrations and arbuscular mycorrhiza on growth, flowering and heavy metal accumulation in scarlet sage (*Salvia splendens* Sello 'Torreador'). Acta Agrobot 60:79–83. <https://doi.org/10.5586/aa.2007.009>
- Ohto M, Onai K, Furukawa Y, Aoki E, Araki T, Nakamura K (2001) Effects of sugar on vegetative development and floral transition in Arabidopsis. PLANT PHYSIOLOGY 127:252–261. <https://doi.org/10.1104/pp.127.1.252>
- Oono Y, Yazawa T, Kawahara Y, Kanamori H, Kobayashi F, Sasaki H, Mori S, Wu J, Handa H, Itoh T, Matsumoto T (2014) Genome-wide transcriptome analysis reveals that cadmium stress signaling controls the expression of genes in drought stress signal pathways in rice. PLoS One 9:e96946. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0096946>
- Pachura P, Ociepa-Kubicka A, Skowron-Grabowska B (2016) Assessment of the availability of heavy metals to plants based on the translocation index and the bioaccumulation factor. Desalination and Water Treatment 57:1469–1477. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1017330>
- Panda SK, Choudhury S, Patra HK (2016) Heavy-Metal-Induced Oxidative Stress in Plants: Physiological and Molecular Perspectives. In: Tuteja N, Gill SS (eds) Abiotic Stress Response in Plants. Wiley, pp 221–236. <https://doi.org/10.1002/9783527694570.ch11>
- Parra-Vega V, Corral-Martínez P, Rivas-Sendra A, Seguí-Simarro JM (2015) Formation and excretion of autophagic plastids (plastolysomes) in *Brassica napus* embryogenic microspores. Front Plant Sci 6:94. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00094>
- Perfus-Barbeoch L, Leonhardt N, Vavasseur A, Forestier C (2002) Heavy metal toxicity: Cadmium permeates through calcium channels and disturbs the plant water status. Plant J 32:539–548
- Pluskota WE, Szablińska J, Obendorf RL, Górecki RJ, Lahuta LB (2015) Osmotic stress induces genes, enzymes and accumulation of galactinol, raffinose and stachyose in seedlings of pea (*Pisum sativum* L.). Acta Physiol Plant 37. <https://doi.org/10.1007/s11738-015-1905-9>

- Rai V, Khatoon S, Bisht SS, Mehrotra S (2005) Effect of cadmium on growth, ultramorphology of leaf and secondary metabolites of *Phyllanthus amarus* Schum. and Thonn. *Chemosphere* 61:1644–1650. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.04.052>
- Robards K, Worsfold P (1991) Cadmium: toxicology and analysis. A review. *Analyst* 116:549–568. <https://doi.org/10.1039/AN9911600549>
- Rodríguez-Serrano M, Romero-Puertas MC, Zabalza A, Corpas FJ, Gómez M, Del Río LA, Sandalio LM (2006) Cadmium effect on oxidative metabolism of pea (*Pisum sativum* L.) roots. Imaging of reactive oxygen species and nitric oxide accumulation in vivo. *Plant Cell Environ* 29:1532–1544. <https://doi.org/10.1111/J.1365-3040.2006.01531.X>
- Romero-Puertas MC, Corpas FJ, Rodríguez-Serrano M, Gómez M, Del Río LA, Sandalio LM (2007) Differential expression and regulation of antioxidative enzymes by cadmium in pea plants. *Journal of Plant Physiology* 164:1346–1357. <https://doi.org/10.1016/J.JPLPH.2006.06.018>
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 września 2016 r. w sprawie sposobu prowadzenia oceny zanieczyszczenia powierzchni ziemi. Dz.U. z 2016 r., poz. 1395, Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej
- Salvi P, Kamble NU, Majee M (2018) Stress-Inducible Galactinol Synthase of Chickpea (CaGolS) is Implicated in Heat and Oxidative Stress Tolerance Through Reducing Stress-Induced Excessive Reactive Oxygen Species Accumulation. *Plant Cell Physiol* 59:155–166. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcx170>
- Sandalio LM, Dalurzo HC, Gómez M, Romero-Puertas MC, del Río LA (2001) Cadmium-induced changes in the growth and oxidative metabolism of pea plants. *J Exp Bot* 52:2115–2126
- Sanyal R, Kumar S, Pattanayak A, Kar A, Bishi SK (2023) Optimizing raffinose family oligosaccharides content in plants: A tightrope walk. *Front Plant Sci* 14:1134754. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1134754>
- Schneider T, Keller F (2009) Raffinose in chloroplasts is synthesized in the cytosol and transported across the chloroplast envelope. *Plant Cell Physiol* 50:2174–2182. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcp151>
- Sengupta S, Mukherjee S, Basak P, Majumder AL (2015) Significance of galactinol and raffinose family oligosaccharide synthesis in plants. *Front Plant Sci* 6:656. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00656>
- Sharma JK, Kumar N, Singh NP, Santal AR (2023) Phytoremediation technologies and their mechanism for removal of heavy metal from contaminated soil: An approach for a sustainable environment. *Front Plant Sci* 14:1076876. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1076876>
- Shukla UC, Singh J, Joshi PC, Kakkar P (2003) Effect of bioaccumulation of cadmium on biomass productivity, essential trace elements, chlorophyll biosynthesis, and macromolecules of wheat seedlings. *Biol Trace Elem Res* 92:257–274. <https://doi.org/10.1385/BTER:92:3:257>
- Simpson GG, Dean C (2002) Arabidopsis, the rosetta stone of flowering time? *Science* 296:285–289. <https://doi.org/10.1126/science.296.5566.285>
- Sree KS, Appenroth K-J (2014) Increase of starch accumulation in the duckweed *Lemna minor* under abiotic stress. *Albanian Journal of Agricultural Sciences* 13:11–14

- Sun X, Zhang J, Zhang H, Ni Y, Zhang Q, Chen J, Guan Y (2010) The responses of *Arabidopsis thaliana* to cadmium exposure explored via metabolite profiling. *Chemosphere* 78:840–845. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.11.045>
- Takeno K (2016) Stress-induced flowering: the third category of flowering response. *J Exp Bot* 67:4925–4934. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw272>
- Thornton I (1986) Geochemistry of cadmium. In: Mislin H, Ravera O (eds) *Cadmium in the Environment*, vol 50. Birkhäuser Basel, Basel, pp 7–12. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-7238-6_1
- Tulbek MC, Lam R, Wang Y, Asavajaru P, Lam A (2017) Pea. In: *Sustainable Protein Sources*. Elsevier, pp 145–164. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802778-3.00009-3>
- UE (2021) Cadmium in food - Scientific opinion of the Panel on Contaminants in the Food Chain. *Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej* 1323:13–18. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2009.980>
- van Doorn WG, Kirasak K, Sonong A, Srihiran Y, van Lent J, Ketsa S (2011) Do plastids in *Dendrobium* cv. Lucky Duan petals function similar to autophagosomes and autolysosomes? *Autophagy* 7:584–597. <https://doi.org/10.4161/auto.7.6.15099>
- Vishwanath SJ, Delude C, Domergue F, Rowland O (2015) Suberin: biosynthesis, regulation, and polymer assembly of a protective extracellular barrier. *Plant Cell Rep* 34:573–586. <https://doi.org/10.1007/s00299-014-1727-z>
- Wang H-Q, Xuan W, Huang X-Y, Mao C, Zhao F-J (2021) Cadmium Inhibits Lateral Root Emergence in Rice by Disrupting OsPIN-Mediated Auxin Distribution and the Protective Effect of OsHMA3. *Plant Cell Physiol* 62:166–177. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcaa150>
- Wang WY, Xu J, Liu XJ, Yu Y, Ge Q (2012) Cadmium induces early flowering in *Arabidopsis*. *Biol Plant* 56:117–120. <https://doi.org/10.1007/s10535-012-0025-2>
- Williams CR, Harrison RM (1986) Cadmium in the atmosphere. In: Mislin H, Ravera O (eds) *Cadmium in the Environment*, vol 50. Birkhäuser Basel, Basel, pp 17–24. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-7238-6_3
- Xie Y, Wang J, Zheng L, Wang Y, Luo L, Ma M, Zhang C, Han Y, Beeckman T, Xu G, Cai Q, Xuan W (2019) Cadmium stress suppresses lateral root formation by interfering with the root clock. *Plant Cell Environ* 42:3182–3196. <https://doi.org/10.1111/pce.13635>
- Yue R, Lu C, Qi J, Han X, Yan S, Guo S, Liu L, Fu X, Chen N, Yin H, Chi H, Tie S (2016) Transcriptome Analysis of Cadmium-Treated Roots in Maize (*Zea mays* L.). *Front Plant Sci* 7:1298. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01298>
- Zhan Y, Zhang C, Zheng Q, Huang Z, Yu C (2017) Cadmium stress inhibits the growth of primary roots by interfering auxin homeostasis in *Sorghum bicolor* seedlings. *J. Plant Biol.* 60:593–603. <https://doi.org/10.1007/s12374-017-0024-0>
- Zhao H, Guan J, Liang Q, Zhang X, Hu H, Zhang J (2021) Effects of cadmium stress on growth and physiological characteristics of sassafras seedlings. *Sci Rep* 11:9913. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89322-0>
- Zhu XF, Wang ZW, Dong F, Lei GJ, Shi YZ, Li GX, Zheng SJ (2013) Exogenous auxin alleviates cadmium toxicity in *Arabidopsis thaliana* by stimulating synthesis of hemicellulose 1 and

increasing the cadmium fixation capacity of root cell walls. J Hazard Mater 263 Pt 2:398–403.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.09.018>

4.b Drugie osiągnięcie naukowe przedstawione do oceny.

Tytuł osiągnięcia naukowego: „**Rola krzemu w modyfikacji skutków stresu kadmowego u grochu siewnego (*Pisum sativum* L.)**”

Osiągnięcie stanowi cykl trzech publikacji naukowych opublikowanych w latach 2022-2024. **We wszystkich publikacjach pełniłam funkcję autora korespondencyjnego.** Wszystkie publikacje ukazały się w indeksowanych bazach naukowych. Prace zostały przedstawione w układzie chronologicznym, a mój szczegółowy udział podano poniżej tytułu każdej publikacji.

Wyniki przedstawione w publikacjach wchodzących w skład drugiego osiągnięcia powstały w trakcie realizacji projektu badawczego OPUS 18 „Nowe strategie otrzymywania związków bioaktywnych na bazie krzemu”. Projekt, którego kierownikiem była Pani dr hab. Małgorzata Szultka-Młyńska, prof. UMK, realizowany był w konsorcjum z Wydziałem Chemii, Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu. Wydział Biologii i Biotechnologii, Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego był konsorcjantem w tym projekcie, a ja pełniłam funkcję koordynatora projektu ze strony UWM.

Kopie publikacji zamieszczono w **Załączniku 5**, a oświadczenia współautorów o udziale w powstaniu tych prac – w **Załączniku 7**.

Podsumowanie naukometryczne:

Sumaryczny Impact Factor (IF), według **Journal Citation Reports (JCR)**, wymienionych prac, podany z uwzględnieniem roku wydania publikacji, wynosi **10,3**.

Sumaryczna liczba punktów wymienionych prac, według list punktowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (**MNiSW**), lub Ministerstwo Edukacji i Nauki (**MEiN**) dla czasopism naukowych, właściwych dla roku wydania publikacji, wynosi **340** punktów.

4.b.1 Wykaz publikacji dokumentujących drugie osiągnięcie naukowe

H 2_1 Orzoł, A., Cruzado-Tafur, E., Gołębiowski, A., Rogowska, A., Pomastowski, P., Górecki, R. J., Buszewski, B., Szultka-Młyńska, M., & **Głowacka, K.** (2023). Comprehensive Study of Si-Based Compounds in Selected Plants (*Pisum sativum* L., *Medicago sativa* L., *Triticum aestivum* L.). *Molecules*, 28, 1–43. <https://doi.org/10.3390/molecules28114311>

Punkty MNiSW / MEiN – 140; Impact Factor – 4.2

Mój wkład polegał na opracowaniu koncepcji pracy wraz z kierownikiem projektu Panią dr hab. Małgorzatą Szultką-Młyńską, prof. UMK oraz Panem prof. dr hab. Bogusławem Buszewskim. Brałam udział w przygotowaniu oryginalnej wersji manuskryptu (jestem autorem rozdziałów 5, 6 i 7), przeprowadziłam redakcję i edycję manuskryptu. Przygotowałam odpowiedzi na recenzje, uwzględniając sugestie współautorów oraz opracowałam ostateczną wersję publikacji. Jestem jednym z dwóch autorów korespondencyjnych publikacji.

H 2_2 Cruzado-Tafur, E., Orzoł, A., Gołębiowski, A., Pomastowski, P., Cichorek, M., Olszewski, J., Walczak-Skierska, J., Buszewski, B., Szultka-Młyńska, M., & **Głowacka, K.** (2023). Metal tolerance and Cd phytoremoval ability in *Pisum sativum* grown in spiked nutrient solution. *Journal of Plant Research*, 136, 931–945. <https://doi.org/10.1007/s10265-023-01493-1>

Punkty MNiSW / MEiN – 100; Impact Factor – 2.7

Mój udział polegał na opracowaniu koncepcji układu doświadczalnego, planu przebiegu uprawy roślin oraz założeń przeprowadzonych badań fizjologicznych. Uczestniczyłam w przygotowaniu metodyki barwienia tkanek z zastosowaniem odczynnika Schiffa oraz w przeprowadzeniu analizy lokalizacji peroksydacji lipidów. Brałam również udział w tworzeniu treści publikacji, jej redakcji i edycji. Przygotowałam odpowiedzi na recenzje, uwzględniając sugestie współautorów oraz opracowałam ostateczną wersję publikacji. Jestem autorem korespondencyjnym publikacji.

H 2_3 Gołębiowski, A., Szultka-Młyńska, M., Pomastowski, P., Rafińska, K., Orzoł, A., Cichorek, M., Olszewski, J., Buszewski, B. & **Głowacka, K.** (2024) Role of Silicon in Counteracting Cadmium Stress in Pea Plants (*Pisum sativum* L.): Insights Into Cadmium

Binding Mechanisms and Pectin Methylesterase Activity. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 24(3), 5613–5625. <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01929-0>

Punkty MNiSW / MEiN – 100; Impact Factor – 3.4

Mój udział polegał na opracowaniu koncepcji układu doświadczalnego, planu przebiegu uprawy roślin oraz założeń przeprowadzonych badań fizjologicznych. Analizę lokalizacji kadmu w tkankach grochu przeprowadziłam we współpracy z Panem mgr. Mateuszem Cichorkiem. Brałam udział w tworzeniu treści publikacji, a także przeprowadziłam jej redakcję i edycję. Przygotowałam odpowiedzi na recenzje, uwzględniając sugestie współautorów oraz opracowałam ostateczną wersję publikacji. Jestem autorem korespondencyjnym publikacji.

4.b.2 Omówienie osiągnięć wchodzących w skład drugiego osiągnięcia

4.b.2.1 Zarys koncepcji i cele badań

Choć główny nurt moich badań dotyczy poznania negatywnego wpływu kadmu na rośliny, to nieodłączną stała się myśl o zbadaniu sposobów jego znoszenia. Z danych literaturowych ostatnich lat wynika, że szczególnie obiecującym dla realizacji tego celu może być wykorzystanie związków krzemu (Si). Badania nad wpływem krzemu na fizjologię roślin były jednym z zagadnień, które realizowałam w ramach projektu OPUS18 pt. „Nowe strategie otrzymywania związków bioaktywnych na bazie krzemu”, prowadzonego w konsorcjum z Wydziałem Chemii, UMK. W projekcie tym pełniłam funkcję koordynatora oraz wykonawcy zadań na UWM w Olsztynie. Moje badania koncentrowały się na analizie zmian rozwojowych i fizjologicznych (w tym na poziomie komórkowym i subkomórkowym) grochu w warunkach różnej suplementacji krzemem oraz ekspozycji na kadm. Aktualny stan wiedzy na temat wpływu krzemu w łagodzeniu negatywnego wpływu stresów biotycznych i abiotycznych (stres solny, susza oraz metale ciężkie, w tym kadm) na rośliny został opisany w pracy przeglądowej (opublikowanej w 2022 roku), której jestem współautorem i autorem korespondencyjnym [H 2_1]. W opracowaniu zawarto również informacje na temat występowania krzemu, sposobów jego pobierania przez rośliny oraz metodach analitycznych wykorzystywanych w badaniach nad tym pierwiastkiem [H 2_1].

Krzem występuje głównie w glebie w postaci stałych form krystalicznych, takich jak kwarc, mika, minerały mikrokrystaliczne lub jako wtórne minerały krzemianowe (Cornelis and Delvaux 2016; Souri et al. 2021). Dominującą rozpuszczalną formą krzemu w roztworze

glebowym jest kwas ortokrzemowy (H_4SiO_4) i w tej formie jest on pobierany przez rośliny. W formie nienaładowanej cząsteczki monomeru H_4SiO_4^* występuje w środowisku o pH od 2 do 9, natomiast gdy pH jest wyższe niż 9, przyjmuje postać zjonizowaną H_3SiO_4^- i $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ (Knight and Kinrade 2001). Dlatego też w większości gleb o pH poniżej 9 występuje niezdysonansowany kwas ortokrzemowy, a jego stężenie waha się od 0,1 do 0,6 mM (Epstein 1994). Wykazano, że u kukurydzy i ryżu warunki lekko kwaśne lub obojętne roztworu glebowego sprzyjają akumulacji krzemu (Tavakkoli et al. 2011; Sandhya and Prakash 2019; Sirisuntornlak et al. 2021).

Rośliny pobierają krzem zarówno na drodze transportu biernego, jak i aktywnego. Wysoką zdolność do akumulacji tego pierwiastka wykazują gatunki z rodziny traw (*Poaceae* (R. Br.) Barnh.) i turzyc (*Cyperaceae* Juss.), średnią - rośliny z rzędu dyniowców (*Cucurbitales* Dumort.), pokrzywoców (*Urticales* Dumort. obecnie *Rosales*) oraz rodziny komelinowatych (*Commelinaceae* R. Br.), a niską - większość innych gatunków roślin (Ma and Takahashi 2002). Dlatego, mimo doniesień o korzystnym wpływie nawozów krzemowych na zwiększenie odporności roślin na stresy, w tym redukcję toksyczności metali ciężkich (Luyckx et al. 2017; Bhat et al. 2019), efektywność działania krzemu na poszczególne gatunki roślin uprawnych wymaga dalszych badań. Jest to szczególnie ważne w przypadku roślin o niskiej zdolności do akumulacji tego pierwiastka, a do takich należy groch siewny (*Pisum sativum* L.), zaliczany do roślin wykluczających krzem (zawartość Si <0,5% w suchej masie). Dotychczasowe badania wskazują, że korzystny wpływ krzemu na rośliny wynika z indukowania zmian, takich jak modyfikacje struktury ścian komórkowych oraz zmiany metaboliczne, w tym aktywacja mechanizmów obronnych (Ma 2004; Ma and Yamaji 2006; Liang et al. 2007; Luyckx et al. 2017; Bakhat et al. 2018; Etesami and Jeong 2018; Bhat et al. 2019; Souri et al. 2021). Jednak dokładny mechanizm jego działania w warunkach stresu nie jest do końca poznany [H 2_1].

Zrozumienie procesów adaptacyjnych oraz sposobów zwiększenia tolerancji roślin na zanieczyszczenia środowiskowe pod wpływem krzemu stanowiło podstawę do przeprowadzenia badań, których wyniki stanowią drugie osiągnięcie habilitacyjne. W pierwszej kolejności analizowano **wpływ krzemu na akumulację kadmu w różnych organach grochu** oraz wpływ pH pożywki na ten proces [H 2_2]. Drugim ważnym zagadnieniem była ocena **roli krzemu w przebudowie ścian komórkowych**, ze szczególnym uwzględnieniem zawartości pektyn i aktywności metyloesterazy pektynowej (PME, ang. *pectin methylesterase*) w korzeniach grochu [H 2_3]. Dodatkowo badano **wpływ krzemu na fizjologię i aktywność**

metaboliczną grochu w warunkach kontrolnych i stresu kadmowego. W tym celu przeprowadzono analizy aktywności oksydazy polifenolowej (PPO, *ang. polyphenol oxidase activity*), całkowitej zawartości fenoli (TPC, *ang. total phenolic content*), zawartości malondialdehydu (MDA, *ang. malondialdehyde*) oraz stopnia peroksydacji lipidów (LPO, *ang. lipid peroxidation*) [H 2_2].

4.b.2.2 Opis osiągniętych wyników i ich znaczenia

Suplementacja roślin krzemem może zarówno zwiększać (Hu et al. 2023), jak i zmniejszać (Feng Shao et al. 2017) akumulację kadmu, a jego działanie zależy od wielu czynników, w tym od gatunku rośliny i właściwości gleby. Dlatego też, jedną z podstawowych kwestii drugiego osiągnięcia naukowego było ustalenie czy i w jaki sposób egzogeny krzem wpływa na gromadzenie i translokację kadmu u grochu. W ramach tego zagadnienia badano również wpływ pH pożywki podczas uprawy hydroponicznej grochu [H 2_2].

Wykazano, że niezależnie od suplementacji krzemem, kadm jest akumulowany głównie w korzeniach. Jednocześnie zaobserwowano, że **krzem ograniczał akumulację kadmu na co wskazuje obniżenie współczynnika bioakumulacji (BCF) tego pierwiastka zarówno w korzeniach, jak i pędach roślin traktowanych kadmem i suplementowanych krzemem, w porównaniu do roślin traktowanych wyłącznie kadmem.** Potwierdzono również, że **krzem aplikowany w stężeniu 1 mM Na₂SiO₃ zwiększał gromadzenie kadmu przy niższym odczynie środowiska (pH 5.0) [H 2_2].** Powyższa obserwacja może mieć istotne **znaczenie także w kontekście wykorzystania krzemu do ograniczania toksycznego wpływu kadmu (i przypuszczalnie innych metali ciężkich) na rośliny uprawne oraz fitoremediacji gleb zanieczyszczonych tym metalem.**

Wykazano również, że **egzogeny krzem wykazuje działanie ochronne, utrzymując wyższą zawartość pektyn (nawet po traktowaniu roślin kadmem) i ograniczając toksyczne działanie Cd w korzeniach [H 2_3].** Podwyższony poziom pektyn po zastosowaniu krzemu zaobserwowano również u innych roślin np. u ryżu i *Sedum alfredii* Hence (Guo et al. 2022; Yang et al. 2024). Wiązanie kadmu w przestrzeniach międzykomórkowych/ścianach komórkowych może wynikać, z obecności kwasu galakturonowego, kluczowego składnika pektyn. **Indukowana przez krzem zmiana w subkomórkowej lokalizacji kadmu, polegająca na wiązaniu przez pektyny, może skutkować ograniczeniem jego gromadzenia**

w cytoplazmie, w tym w wakuolach. Potwierdzają to badania prowadzone na jęczmieniu (Khlifi et al. 2024) oraz *Sedum alfredii* Hence (Yang et al. 2024).

Ponadto w korzeniach roślin suplementowanych krzemem zaobserwowano podwyższoną aktywność metyloesterazy pektynowej (PME), enzymu katalizującego demetylację estrów metylowych kwasu galakturonowego (Gonzalez and Rosso 2011), co prowadzi do zwiększenia liczby wolnych grup karboksylowych ($-\text{COO}^-$) w pektynach [H 2_3]. Badania Guo et al. (2024) i Yang et al. (2024) potwierdziły, że krzem indukuje ekspresję genów związanych z biosyntezą ścian komórkowych, w tym genów kodujących PME. Zwiększona aktywność PME sprzyja wiązaniu jonów, w tym kadmu, w przestrzeni zewnątrzkomórkowej, utrudniając tym samym jego transport symplastyczny i apoplastyczny w obrębie tkanek korzenia, jak i z korzeni do pędów [H 2_3]. Uzyskane wyniki potwierdzają, że suplementacja krzemem znacząco zmienia skład ściany komórkowej, podkreślając jego rolę w zwiększaniu naturalnych mechanizmów obronnych rośliny przed toksycznością kadmu [H 2_3].

Rolę krzemu w obniżaniu toksyczności kadmu oceniano również poprzez analizę odpowiedzi fizjologicznej roślin [H 2_2]. Badania zespołu projektu badawczego OPUS 18 wykazały, że suplementacja krzemem doprowadziła do zwiększonej akumulacji związków bioaktywnych, w tym flawonoidów (takich jak flawon i kwercetyna) oraz kwasów fenolowych (kwasu chlorogenowego i salicylowego) w ekstraktach z roślin grochu (Walczak-Skierska et al. 2024). Rola związków fenolowych (PC, *ang. phenolic compounds*), w fizjologii roślin jest bardzo szeroka. Związki fenolowe jako metabolity wtórne są ważnymi składnikami roślin, niezbędnymi do syntezy m.in. lignin. Związki te biorą również udział w mechanizmach obronnych roślin, działają jako antyoksydanty, usuwają reaktywne formy tlenu i tym samym redukują objawy stresu oksydacyjnego (Goncharuk and Zagoskina 2023) lub wiążą jony metali ciężkich, w tym kadm (Elguera et al. 2013). W badaniach przedstawionych w drugim osiągnięciu analizowano wpływ krzemu na całkowitą zawartość fenoli (TPC), aktywność oksydazy polifenolowej (PPO) oraz zawartość dialdehydu malonowego (MDA) [H 2_2]. Oksydaza polifenolowa to enzym, który bezpośrednio przekazuje elektrony na O_2 podczas utleniania pośrednich produktów oddychania komórkowego u roślin. Ponadto PPO może uczestniczyć w syntezie związków zawierających grupy fenolowe, takich jak ligniny (Thipyapong et al. 2007; Sullivan 2015). Dodatkową funkcją oksydazy polifenolowej jest neutralizacja ROS, chociaż kluczową rolę w tym procesie odgrywają enzymy, takie jak katalaza

czy dysmutaza ponadtlenkowa. W opisywanych badaniach wykazano, że po **dodaniu egzogenne**go krzemu całkowita zawartość fenoli była niższa, podobnie jak w przypadku kadmu, co wskazuje, że groch może wykorzystywać fenole jako antyoksydanty w odpowiedzi na stres oksydacyjny lub że krzem wpływa na ich metabolizm. W odróżnieniu od TPC, suplementacja roślin krzemem znacznie obniżała aktywność PPO w porównaniu do roślin traktowanych kadmem, u których zanotowano jego najwyższą aktywność. Może to sugerować, że **krzem modyfikuje odpowiedź roślin na stres, wpływając na aktywność enzymatyczną związanych z metabolizmem polifenoli, a tym samym skutecznie ogranicza powstawanie ROS i redukuje stres oksydacyjny** [H 2_2].

Oznaką nadmiernej produkcji ROS w komórkach jest zwiększona zawartość dialdehydu malonowego (MDA), który jest stosowany jako biomarker stresu oksydacyjnego i peroksydacji lipidów (Del Rio et al. 2005). Przesłanką do wykorzystania tej metody były wcześniejsze badania prowadzone na *Arachis hypogaea*, które wykazały, że suplementacja krzemem redukuje zawartość MDA w roślinach poddanych stresowi wywołanemu obecnością glinu (Al), co sugeruje, że krzem przyczynia się do poprawy stabilności błon biologicznych (Shen et al. 2014). Wyniki prezentowanych badań potwierdzają, że **działanie ochronne krzemu wiąże się z obniżaniem poziomu MDA (co zaobserwowano w pędach roślin traktowanych krzemem i kadmem) w porównaniu do roślin kontrolnych** [H 2_2]. Efekt ten był widoczny w pędach (ale nie w korzeniach), szczególnie po zastosowaniu 1 mM Na₂SiO₃ [H 2_2]. Co więcej, krzem obniżył poziom peroksydacji lipidów (LPO), co wykazano w badaniach histochemicznych z wykorzystaniem odczynnika Schiffa [H 2_2]. Podobne wyniki obserwowano również u grochu po zastosowaniu nanocząstek krzemu w warunkach stresu wywołanego przez chrom [Cr(VI)] (Tripathi et al. 2015). **Ochronny efekt krzemu był szczególnie widoczny w liściach grochu po aplikacji 1 mM Na₂SiO₃, co podkreśla potencjalne korzyści wynikające z suplementacji krzemem w kontekście redukcji stresu oksydacyjnego i ochrony przed skutkami toksyczności metali ciężkich** [H 2_2].

Prezentowane w osiągnięciu wyniki sugerują [H 2_2], że **ochronne działanie krzemu w stresie kadmowym polega na redukcji uszkodzeń lipidów i stabilizacji błon komórkowych. Jednocześnie zanotowane różnice w odpowiedzi między pędami (liśćmi) a korzeniami, zarówno w przypadku zmian zawartości TPC, MDA, aktywności PPO, jak i wyników barwienia, wskazują na odmienne mechanizmy regulujące procesy peroksydacji lipidów w tych organach** [H 2_2].

4.b.2.3 Podsumowanie drugiego osiągnięcia habilitacyjnego

Najważniejszym osiągnięciem naukowym jest wskazanie roli krzemu w modyfikowaniu skutków stresu kadmowego u grochu. Wykazano, że krzem pełni istotną funkcję w procesach detoksykacji oraz adaptacji roślin do stresu kadmowego, poprzez:

- **obniżenie współczynnika bioakumulacji (BCF) kadmu** w pędach i korzeniach grochu; przeciwdziałanie toksyczności kadmu w korzeniach może zależeć od stężenia krzemu w roztworze hydroponicznym oraz pH środowiska [H 2_2];
- **modyfikację właściwości ścian komórkowych korzeni**, co może przyczyniać się do zmniejszenia toksyczności kadmu (zwiększenie poziomu pektyn oraz aktywności metyloesterazy pektynowej w porównaniu do roślin traktowanych kadmem [H 2_3]);
- **zwiększenie zdolności antyoksydacyjnych roślin (pędów)**, co prowadzi do redukcji stresu oksydacyjnego poprzez obniżenie aktywności oksydazy polifenolowej, zmniejszenie poziomu dialdehydu malonowego oraz stabilizację struktur komórkowych [H 2_2]).

Sugeruje to możliwość wykorzystania suplementacji krzemem jako skutecznej strategii ochrony roślin przed toksycznym działaniem metali ciężkich.

4.b.2.4 Plany dalszych badań

Kolejnym zagadnieniem, które planuję poddać analizie, jest ocena potencjału zastosowania nanocząstek krzemu i ich roli w modyfikacji odpowiedzi fizjologicznej roślin eksponowanych na działanie stresów abiotycznych, w tym kadmu. Szczególne zainteresowanie wzbudza technika **nanoprimeringu**, która polega na traktowaniu nasion nanocząstkami przed siewem, w celu wzmocnienia ich odporności na stresy (Luyckx et al. 2017). Dzięki swojej **niskiej wielkości i dużej powierzchni aktywnej**, nanocząstki krzemu mogą łatwiej wnikać do komórek roślinnych, stymulując ich mechanizmy obronne oraz poprawiając struktury ścian komórkowych. Dodatkowo nanoprimering może mieć istotne znaczenie w **zrównoważonym rolnictwie** oraz w **ochronie środowiska**, zmniejszając potrzebę stosowania chemicznych środków ochrony roślin. W ten sposób nanocząstki krzemu mogą stać się kluczowym narzędziem w walce z negatywnymi skutkami zanieczyszczenia środowiska metalami ciężkimi, a także w poprawie wydajności upraw.

4.b.2.5 *Literatura*

- Bakhat HF, Bibi N, Zia Z, Abbas S, Hammad HM, Fahad S, Ashraf MR, Shah GM, Rabbani F, Saeed S (2018) Silicon mitigates biotic stresses in crop plants: A review. *Crop Protection* 104:21–34. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.10.008>
- Bhat JA, Shivaraj SM, Singh P, Navadagi DB, Tripathi DK, Dash PK, Solanke AU, Sonah H, Deshmukh R (2019) Role of Silicon in Mitigation of Heavy Metal Stresses in Crop Plants. *Plants (Basel)* 8. <https://doi.org/10.3390/plants8030071>
- Cornelis J-T, Delvaux B (2016) Soil processes drive the biological silicon feedback loop. *Funct Ecol* 30:1298–1310. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12704>
- Del Rio D, Stewart AJ, Pellegrini N (2005) A review of recent studies on malondialdehyde as toxic molecule and biological marker of oxidative stress. *Nutr Metab Cardiovasc Dis* 15:316–328. <https://doi.org/10.1016/j.numecd.2005.05.003>
- Elguera JCT, Barrientos EY, Wrobel K, Wrobel K (2013) Effect of cadmium (Cd(II)), selenium (Se(IV)) and their mixtures on phenolic compounds and antioxidant capacity in *Lepidium sativum*. *Acta Physiol Plant* 35:431–441. <https://doi.org/10.1007/s11738-012-1086-8>
- Epstein E (1994) The anomaly of silicon in plant biology. *Proc Natl Acad Sci U S A* 91:11–17. <https://doi.org/10.1073/pnas.91.1.11>
- Etesami H, Jeong BR (2018) Silicon (Si): Review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 147:881–896. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.09.063>
- Feng Shao J, Che J, Yamaji N, Fang Shen R, Feng Ma J (2017) Silicon reduces cadmium accumulation by suppressing expression of transporter genes involved in cadmium uptake and translocation in rice. *J Exp Bot* 68:5641–5651. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx364>
- Goncharuk EA, Zagorskina NV (2023) Heavy Metals, Their Phytotoxicity, and the Role of Phenolic Antioxidants in Plant Stress Responses with Focus on Cadmium: Review. *Molecules* 28. <https://doi.org/10.3390/molecules28093921>
- Gonzalez SL, Rosso ND (2011) Determination of pectin methylesterase activity in commercial pectinases and study of the inactivation kinetics through two potentiometric procedures. *Ciênc. Tecnol. Aliment.* 31:412–417. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612011000200020>
- Guo J, Ye D, Zhang X, Huang H, Wang Y, Zheng Z, Li T, Yu H (2022) Characterization of cadmium accumulation in the cell walls of leaves in a low-cadmium rice line and strengthening by foliar silicon application. *Chemosphere* 287:132374. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132374>
- Guo J, Ye D, Zhang X, Huang H, Wang Y, Zheng Z, Li T, Yu H (2024) Regulatory mechanism of silicon in strengthening cadmium immobilization in the foliar cell wall of a grain low-cadmium rice line. <https://doi.org/10.22541/au.170666197.70535275/v1>
- Hu Y, Zhou X, an Shi, Yu Y, Rensing C, Zhang T, Xing S, Yang W (2023) Exogenous silicon promotes cadmium (Cd) accumulation in *Sedum alfredii* Hance by enhancing Cd uptake and alleviating Cd toxicity. *Front Plant Sci* 14:1134370. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1134370>

- Khelifi N, Ghabriche R, Ayachi I, Zorrig W, Ghnaya T (2024) How does silicon alleviate Cd-induced phytotoxicity in barley, *Hordeum vulgare* L.? *Chemosphere* 362:142739. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142739>
- Knight CT, Kinrade SD (2001) Chapter 4 A primer on the aqueous chemistry of silicon. In: Datnoff LE, Snyder GH, Korndörfer GH (eds) *Silicon in agriculture*, 1st edn., vol 8. Elsevier, New York, pp 57–84. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80008-2](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80008-2)
- Liang Y, Sun W, Zhu Y-G, Christie P (2007) Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. *Environ Pollut* 147:422–428. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.06.008>
- Luyckx M, Hausman J-F, Lutts S, Guerriero G (2017) Silicon and Plants: Current Knowledge and Technological Perspectives. *Front Plant Sci* 8:411. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00411>
- Ma JF (2004) Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Soil Science and Plant Nutrition* 50:11–18. <https://doi.org/10.1080/00380768.2004.10408447>
- Ma JF, Takahashi E (2002) *Soil, Fertilizer, and Plant Silicon Research in Japan*. Elsevier, Burlington
- Ma JF, Yamaji N (2006) Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends Plant Sci* 11:392–397. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.06.007>
- Sandhya K, Prakash NB (2019) Bioavailability of Silicon from Different Sources and Its Effect on the Yield of Rice in Acidic, Neutral, and Alkaline soils of Karnataka, South India. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 50:295–306. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1563096>
- Shen X, Xiao X, Dong Z, Chen Y (2014) Silicon effects on antioxidative enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of peanut under aluminum stress. *Acta Physiol Plant* 36:3063–3069. <https://doi.org/10.1007/s11738-014-1676-8>
- Sirisuntornlak N, Ullah H, Sonjaroon W, Anusontpornperm S, Arirob W, Datta A (2021) Interactive Effects of Silicon and Soil pH on Growth, Yield and Nutrient Uptake of Maize. *Silicon* 13:289–299. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00427-z>
- Souri Z, Khanna K, Karimi N, Ahmad P (2021) Silicon and Plants: Current Knowledge and Future Prospects. *J Plant Growth Regul* 40:906–925. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10172-7>
- Sullivan ML (2015) Beyond brown: polyphenol oxidases as enzymes of plant specialized metabolism. *Front Plant Sci* 5:1–7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00783>
- Tavakkoli E, Lyons G, English P, Guppy CN (2011) Silicon nutrition of rice is affected by soil pH, weathering and silicon fertilisation. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 174:437–446. <https://doi.org/10.1002/jpln.201000023>
- Thipyapong P, Stout M, Attajarusit J (2007) Functional Analysis of Polyphenol Oxidases by Antisense/Sense Technology. *Molecules* 12:1569–1595. <https://doi.org/10.3390/12081569>
- Tripathi DK, Singh VP, Prasad SM, Chauhan DK, Dubey NK (2015) Silicon nanoparticles (SiNp) alleviate chromium (VI) phytotoxicity in *Pisum sativum* (L.) seedlings. *Plant Physiol Biochem* 96:189–198. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2015.07.026>
- Walczak-Skierska J, Krakowska-Sieprawska A, Monedeiro F, Złoch M, Pomastowski P, Cichorek M, Olszewski J, Głowacka K, Gużewska G, Szultka-Młyńska M (2024) Silicon's Influence on

Polyphenol and Flavonoid Profiles in Pea (*Pisum sativum* L.) under Cadmium Exposure in Hydroponics: A Study of Metabolomics, Extraction Efficacy, and Antimicrobial Properties of Extracts. *ACS Omega* 9:14899–14910. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c08327>

Yang W, Hu Y, Liu J, Rao X, Huang X, Guo X, Zhang J, Rensing C, Xing S, Zhang L (2024) Physiology and transcriptomic analysis revealed the mechanism of silicon promoting cadmium accumulation in *Sedum alfredii* Hance. *Chemosphere* 360:142417. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142417>

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

W okresie od 25.08.2005 do 25.08.2006 przebywałam na stażu podoktoranckim w Gyeongsang National University, Division of Applied Life Science and Environmental Biotechnology National Core Research Center, w Korei Południowej (**Załącznik 8**). Podczas stażu pracowałam w zespole kierowanym przez prof. Sung-Ho Lee. Efektem współpracy jest praca opublikowana w *Acta Physiologiae Plantarum*, gdzie opisano wpływ chelatora jonów wapnia (EGTA, kwas etylenoglikol-O-O'-bis(2-aminoetyl)-N,N,N',N' tetraoctowy) na indukcję kwitnienia rośliny dnia krótkiego *Pharbitis nil*.

Podczas swojego pobytu, brałam udział w badaniach prowadzonych w ramach projektu fitoremediacyjnego, którego celem była analiza genów ekspresowanych w roślinach sałaty traktowanych 500 μM CdSO_4 . W badaniach wykorzystano technologię GeneFishing™ DEG (*ang. differentially expressed genes*) do analizy różnicowo ekspresowanych genów, porównując rośliny rosnące na pożywcze z kadmem oraz próby kontrolne. W wyniku analizy zidentyfikowano 75 różnicowo ekspresowanych genów. W ramach projektu byłam odpowiedzialna za transformację roślin z wykorzystaniem przygotowanych konstruków zawierających geny wyselekcjonowane po badaniu GeneFishing™ DEG. Analiza BLAST wykazała, że jeden z wybranych genów wykazywał podobieństwo do genu kodującego białko przenoszące lipidy (*LTP, ang. lipid transfer protein*) a drugi - do genu kodującego białko fotosystemu II. Moim zadaniem była transformacja, w tym infekcja roślin, ich regeneracja oraz analiza uzyskanych transformantów. Było to moje pierwsze zetknięcie z tematyką fitoremediacji oraz wpływem metali ciężkich na rośliny. Po powrocie ze stażu postanowiłam bardziej zgłębić temat fizjologicznych skutków działania kadmu na rośliny.

Głowacka K., Tretyn A., Górecki R., Lee S-H.: EGTA inhibits floral induction of *Pharbitis nil* via its influence on gas exchange properties of stomata. *Acta Physiologiae Plantarum*, vol. 28, nr 5, 2006, s. 477-481

Odbyłam również tygodniowy staż w Laboratorium Mikroskopii Elektronowej w Instytucie im. M. Nenckiego w Warszawie pod kierunkiem Pani prof. dr hab. Elżbiety Wyroby. W trakcie mojego pobytu (od 17.07.2011 do 22.07.2011) poznałam metodę EDS (*ang. Energy Dispersive X-ray Spectrometry*), wykorzystywaną do pomiarów składu jakościowego i ilościowego pierwiastków w mikroskopie elektronowym. W trakcie stażu nauczyłam się zasad prowadzenia analizy promieniowania rentgenowskiego. Wykonywałam analizy pierwiastkowe, w tym mapowanie pierwiastków, preparatów wykonanych z liści i korzeni roślin traktowanych kadmem. Obecnie podstawy metody EDS omawiam w trakcie realizacji przedmiotów: „Techniki mikroskopowe”, „Mikroskopia elektronowa” oraz „Obrazowanie mikroskopowe”, a wcześniej również podczas zajęć pt.: „Mapowanie pierwiastków w mikroskopii elektronowej” i „Zaawansowane techniki mikroskopowe” prowadzonych dla studentów Wydziału Biologii i Biotechnologii, UWM w Olsztynie. Metodę tę zastosowałam w prowadzonych badaniach:

Lahuta L., Szablińska-Piernik J., Stałanowska K., **Głowacka K.**, Horbowicz M.: The Size-Dependent Effects of Silver Nanoparticles on Germination, Early Seedling Development and Polar Metabolite Profile of Wheat (*Triticum aestivum* L.), *International Journal of Molecular Sciences*, MDPI, vol. 23, nr 21, 2022, art. nr 13255, s. 1-14, DOI:10.3390/ijms232113255

Lahuta L., Szablińska-Piernik J., **Głowacka K.**, Stałanowska K., Railean-Plugaru V., Horbowicz M., Pomastowski P., Buszewski B.: The Effect of Bio-Synthesized Silver Nanoparticles on Germination, Early Seedling Development, and Metabolome of Wheat (*Triticum aestivum* L.), *Molecules*, MDPI, vol. 27, nr 7, 2022, art. nr 2303, s. 1-21, DOI:10.3390/molecules27072303

Cydzik-Kwiatkowska A., Rusanowska P., **Głowacka K.**: Operation mode and external carbon dose as determining factors in elemental composition and morphology of aerobic granules, *Archives of Environmental Protection*, Polska Akademia Nauk Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska, vol. 42, nr 1, 2016, s. 74-79, DOI:10.1515/aep-2016-0009

5.a Współpraca naukowa z innymi ośrodkami badawczymi

W swoje pracy naukowej współpracuję również z innymi jednostkami naukowymi w realizacji projektów badawczych, których efektem są powstałe publikacje z listy JCR w tym z:

- **Katedrą Genetyki, Instytutu Biologii Wydziału Nauk Biologicznych i Weterynaryjnych Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu:**

Turkan S., Mierek-Adamska A., **Głowacka K.**, Szydłowska-Czerniak A., Rewers M., Jędrzejczyk I., Dąbrowska G.: Localization and expression of CRSH transcript, level of calcium ions, and cell cycle activity during *Brassica napus* L. seed development, *Industrial Crops and Products*, vol. 195, 2023, art. nr 116439, s. 1-14, DOI:10.1016/j.indcrop.2023.116439

Mój udział polegał na opracowaniu metod badawczych oraz przeprowadzeniu analizy lokalizacji in situ transkryptu CRSH podczas rozwoju nasion Brassica napus L..

– **Katedrą Entomologii, Fitopatologii i Diagnostyki Molekularnej Wydziału Rolnictwa i Leśnictwa Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie:**

Okorski A., Olszewski J., **Głowacka K.**, Okorska S., Pszczółkowska A.: The effect of the application of the biological control agent EM1 on gas exchange parameters and productivity of *Pisum sativum* L. infected with *Fusarium oxysporum* Schlecht, *Acta Agrobotanica*, vol. 63, nr 2, 2010, s. 105-115, DOI:10.5586/aa.2010.038

Mój udział polegał na przeprowadzeniu analizy infekcji wywołanej przez Fusarium oxysporum u grochu.

Okorska S., Dąbrowska J., **Głowacka K.**, Pszczółkowska A., Jankowski K., Jastrzębski J., Oszako T., Okorski A.: The Fungicidal Effect of Essential Oils of Fennel and Hops against *Fusarium* Disease of Pea, *Applied Sciences-Basel*, MDPI, vol. 13, nr 10, 2023, art. nr 6282, s. 1-17, DOI:10.3390/app13106282

Mój udział polegał na przeprowadzeniu analiz efektu olejków eterycznych na rozwój objawów fusariozy na grochu.

Wachowska U., Pluskota W., Jastrzębski J., **Głowacka K.**, Szablewska-Stuper K., Balcerzak M.: A method for reducing the concentrations of *Fusarium graminearum* trichothecenes in durum wheat grain with the use of *Debaryomyces hansenii*, *International Journal of Food Microbiology*, nr 397, 2023, art. nr 110211, s. 1-10, DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2023.110211

Mój udział polegał na analizie infekcji wywołanej przez Fusarium graminearum na powierzchni plew pszenicy trwalej po aplikacji Debaryomyces hansenii w skaningowym mikroskopie elektronowym.

Duba A., Goriewa-Duba K., Wachowska U., **Głowacka K.**, Wiwart M.: The associations between leaf morphology, phenylalanine ammonia lyase activity, reactive oxygen species, and fusarium resistance in selected species of wheat with different ploidy levels, *Plants*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), vol. 8, nr 10, 2019, art. nr 360, s. 1-19, DOI:10.3390/plants8100360

Brałam udział w tworzeniu koncepcji badań, opracowywaniu metod badawczych oraz pozyskiwaniu funduszy na realizację projektu. W ramach mojej roli uczestniczyłam w zapewnieniu niezbędnych zasobów do przeprowadzenia badań, w tym analizy struktury liści (przy użyciu mikroskopu elektronowego skaningowego – SEM), lokalizacji ROS oraz analizy aktywności amoniakolizazy fenyloalaniny (PAL). Uczestniczyłam również w weryfikacji wyników i ich wizualizacji.

Wachowska U., **Głowacka K.**, Mikołajczyk W., Kucharska K.: Biofilm of *Aureobasidium pullulans* var. *pullulans* on winter wheat kernels and its effect on other microorganisms, *Microbiology*, vol. 85, nr 5, 2016, s. 523-530, DOI:10.1134/S0026261716050192

Brałam udział w opracowaniu metod badawczych oraz przeprowadzeniu analizy rozmieszczenia komórek Aureobasidium pullulans na ziarniakach pszenicy.

Wachowska U., **Głowacka K.**: Antagonistic interactions between *Aureobasidium pullulans* and *Fusarium culmorum*, a fungal pathogen of winter wheat, *BioControl*, vol. 59, nr 5, 2014, s. 635-645, DOI:10.1007/s10526-014-9596-5

Mój udział polegał na opracowaniu metod badawczych oraz przeprowadzeniu analizy interakcji pomiędzy Aureobasidium pullulans i Fusarium culmorum przy wykorzystaniu skaningowej mikroskopii elektronowej.

Wachowska U., Irzykowski W., Jędrzycka M., Stasiulewicz-Paluch A., **Głowacka K.**: Biological control of winter wheat pathogens with the use of antagonistic *Sphingomonas* bacteria under greenhouse conditions, *Biocontrol Science and Technology*, vol. 23, nr 10, 2013, s. 1110-1122, DOI:10.1080/09583157.2013.812185

Mój udział polegał na opracowaniu metod badawczych oraz przeprowadzeniu analizy bakterii Sphingomonas przy wykorzystaniu skaningowej mikroskopii elektronowej.

Wachowska U., Stasiulewicz-Paluch A., **Głowacka K.**, Mikołajczyk W., Kucharska K.: Response of epiphytes and endophytes isolated from winter wheat grain to biotechnological and fungicidal treatments, *Polish Journal of Environmental Studies, Institute of Scientific Information in Philadelphia*, vol. 22, nr 1, 2013, s. 267-273

Mój udział polegał na opracowaniu metod badawczych oraz udziale w przeprowadzeniu analizy rozmieszczenia grzybów drożdżopodobnych na ziarniakach pszenicy ozimej.

– **Katedrą Inżynierii Środowiska Instytutu Inżynierii i Ochrony Środowiska Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie:**

Szwarc D., Nowicka A., **Głowacka K.**: Cross-Comparison of the Impact of Grass Silage Pulsed Electric Field and Microwave-Induced Disintegration on Biogas Production Efficiency, *Energies*, MDPI, vol. 15, nr 14, 2022, art. nr 5122, s. 1-10, DOI:10.3390/en15145122

Mój udział polegał na opracowaniu metod badawczych oraz przeprowadzeniu analizy materiałów w skaningowym mikroskopie elektronowym.

Szwarc D., **Głowacka K.**: Increasing the biogas potential of rapeseed straw using pulsed electric field pre-treatment, *Energies*, MDPI, vol. 14, nr 24, 2021, art. nr 8307, s. 1-11, DOI:10.3390/en14248307

Mój udział polegał na opracowaniu metod badawczych oraz przeprowadzeniu analizy materiałów w skaningowym mikroskopie elektronowym.

Cydzik-Kwiatkowska A., Rusanowska P., **Głowacka K.**: Operation mode and external carbon dose as determining factors in elemental composition and morphology of aerobic granules,

Archives of Environmental Protection, Polska Akademia Nauk Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska, vol. 42, nr 1, 2016, s. 74-79, DOI:10.1515/aep-2016-0009

Mój udział polegał na opracowaniu metod badawczych oraz przeprowadzeniu analizy materiałów w skaningowym mikroskopie elektronowym w tym analizy pierwiastkowej przy wykorzystaniu SEM-EDS.

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

6.a Osiągnięcia dydaktyczne

6.a.1 Działalność dydaktyczna i opieka naukowa nad studentami

Jestem koordynatorem oraz prowadzącym wykłady i ćwiczenia dla studentów I stopnia z przedmiotów:

- „Biologia komórki” na kierunkach biotechnologia, biologia oraz mikrobiologia;
- „Mikroskopia świetlna” na kierunku mikrobiologia;
- „Mikroskopia elektronowa” na kierunku mikrobiologia;
- „Techniki mikroskopowe” na kierunku biotechnologia (przedmiot fakultatywny);
- „Cell biology” na kierunku Applied biology;
- “Microscopic techniques” na kierunku Applied biology (przedmiot fakultatywny).

Jestem współkoordynatorem oraz prowadzącym wykłady i ćwiczenia dla studentów II stopnia z przedmiotów:

- „Obrazowanie mikroskopowe” na kierunku biologia w zakresie biologia molekularna oraz w zakresie nauczanie biologii;
- „Bioremediacja i fitoremediacja” na kierunku biotechnologia przemysłowa.

Jestem również koordynatorem oraz prowadzącym wykłady i ćwiczenia dla studentów II stopnia z przedmiotu „Techniki obrazowania oraz analiza danych mikroskopowych” na kierunku biotechnologia (przedmiot fakultatywny).

Byłam koordynatorem i prowadzącym zajęcia z przedmiotów, które nie są już realizowane w związku ze zmianami programów studiów:

- „Cytologia”;
- „Zaawansowane techniki mikroskopowe”;
- „Mapowanie pierwiastków w mikroskopii elektronowej”;

- „Cytofizjologia roślin”;
- „Molekularne mechanizmy rozwoju roślin”.

W trakcie swojej pracy naukowej byłam promotorem **14 prac magisterskich, 2 prac licencjackich i 6 inżynierskich**. Obecnie jestem promotorem **2 prac magisterskich i 2 inżynierskich**.

Jestem również współzałożycielem i opiekunem Koła Naukowego Biologii Komórki, które funkcjonuje na Wydziale Biologii i Biotechnologii UWM w Olsztynie.

6.a.2 Ukończone kursy i szkolenia podnoszące umiejętności dydaktyczne

28.06.2019 uzyskałam certyfikat tutora. Uczestniczyłam w 64-godzinnym kursie certyfikującym Szkoły Tutorów Akademickich Collegium Wratislaviense w ramach eksperckiego szkolenia z tutoring.

15.12.2019 ukończyłam kurs certyfikujący Szkoły Tutorów Akademickich Collegium Wratislaviense. Aktywne metody pracy ze studentami (60 godzin).

W 2019 ukończyłam również kursy: „Platforma zdalnej edukacji Moodle – podstawy” (10 godzin) oraz „Platforma zdalnej edukacji Moodle - tworzenie quizów” (10 godzin) oraz warsztaty "Myślenie wizualne".

W 2021 ukończyłam certyfikowane kursy: „Analiza i wizualizacja danych w R” (30 godzin) oraz kurs „Emisja i higiena głosu” (20 godzin).

W 2020 roku ukończyłam kurs online prowadzony przez Andor Microscopy School (Oxford Instruments Company) dostępny na stronie: <https://andor.oxinst.com/complete-microscopy-training-course>. Na kurs składają się szkolenia dotyczące technik mikroskopowych m.in. „The History of Microscopy, „Transmitted Light Microscopy”, czy też „Principles of Fluorescence Light Microscopy”.

Regularnie uczestniczę w kursach i szkoleniach organizowanych przez Biuro ds. Osób z Niepełnosprawnościami UWM, które dotyczą wsparcia studentów. Ukończone przeze mnie dotychczas szkolenia to:

- „Formy wsparcia edukacyjnego studentów z zaburzeniami psychicznymi”,

- „Zaburzenia depresyjne”,
- „Asertywna postawa wobec studenta z niepełnosprawnością”,
- „Wsparcie Uczelni dla osób w spektrum autyzmu”,
- „Technologie wspierające. Nowe technologie w służbie edukacji uwzględniającej szczególne potrzeby”,
- „Wprowadzenie do tematyki: dostępność cyfrowa i informacyjno-komunikacyjna dla osób ze szczególnymi potrzebami” czy też
- „Pierwsza pomoc przedmedyczna ze szczególnym uwzględnieniem procedur odnoszących się do osób z niepełnosprawnością”.

6.b Osiągnięcia organizacyjne

Pełniłam funkcje sekretarza podczas dwóch konferencji naukowych:

1. **I Konferencji Polskiego Towarzystwa Biologii Eksperymentalnej Roślin**, która odbywała się od 3 do 6 września 2003 roku na Wydziale Biologii Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie.
2. **Międzynarodowej konferencji „9th ISSS Conference on Seed Biology”**, która odbywała się od 6 do 11 lipca 2008 roku na Wydziale Biologii Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie.

Brałam udział w realizacji czterech, zakończonych, projektów badawczych:

1. „Nowe strategie otrzymywania związków bioaktywnych na bazie krzemu”, projekt OPUS 18 realizowany w konsorcjum z Wydziałem Chemii, UMK, Katedra Chemii Środowiska i Bioanalitiky – będącego liderem grupy podmiotów. Projekt realizowany w latach 2019-2024, pełniona funkcja: kierownik zespołu badawczego / koordynator w UWM oraz wykonawca.
2. „Zaawansowane biokompozyty dla gospodarki jutra BIOG-NET”, zadanie 5 (UWM) „Zastosowanie nanomateriałów i biokompozytów w produkcji roślinnej” (nr projektu: POIR.04.04.00-00-1792/18-01). Fundacja Nauka Polska realizowany w latach 2019-2022, pełniona funkcja: wykonawca na stanowisku pracownika technicznego.
3. „Rola grzybów drożdżoidalnych w ziarnie pszenicy ozimej i reakcja na środki ochrony roślin”; grant NCN (NN310116638), realizowany w latach 2010-2013, pełniona funkcja: wykonawca.

4. „Identyfikacja tkankowo-specyficznych promotorów w kiełkujących nasionach pomidora”; Grant KBN (NN301234836), realizowany w latach 2009-2012, pełniona funkcja: wykonawca.

Przez 15 lat (od 2008 roku do 2023 roku) pełniłam funkcję **koordynatora programu Erasmus LLP** (*ang. Lifelong Learning Programme*) i później **Erasmus+** na Wydziale Biologii i Biotechnologii, UWM w Olsztynie.

Dwukrotnie byłam **członkiem Rady Wydziału Biologii**, UWM w Olsztynie oraz **członkiem Wydziałowego Zespołu ds. Zapewnienia Jakości Kształcenia** w latach 2016-2020 oraz **Zespołu ds. Współpracy z Liceami** w latach 2020-2021. Od listopada 2023 jestem członkiem **Komisji ds. Jakości Kształcenia na Wydziale Biologii i Biotechnologii** oraz **Wydziałowego Zespołu ds. Promocji** oraz **Wydziałowej Komisji Konkursowej** na kadencję 2024-2028.

W 2014 roku byłam członkiem zespołu przygotowującego sprawozdanie do Polskiej Komisji Akredytacyjnej.

Pełniłam funkcje **sekretarza Studium Podyplomowego z Biologii** (od 2002 do 2005 roku) oraz **kierownika Studium Podyplomowego: Nauczanie biologii w szkołach gimnazjalnych i ponadgimnazjalnych** (od 2006 do 2018 roku);

7 października 2015 zostałam odznaczona **Medalem Brązowym** za długoletnią służbę.

Otrzymałam **Nagrodę indywidualną Rektora UWM III stopnia** za osiągnięcia w dziedzinie organizacyjnej (01.12.2015).

Otrzymałam **wyróżnienie za uzyskanie wysokiego wyniku w plebiscycie Belfer Roku 2015**.

Byłam koordynatorem dwóch zadań podczas realizacji **projektu „Biotechnologia - kierunek z przyszłością”**, finansowanego z Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki (01.10.2012 - 30.09.2015).

Od października 2023 roku pełnię funkcję opiekuna roku dla studentów II stopnia, kierunku studiów Biologia w zakresie biologia molekularna.

6.c Osiągnięcia popularyzujące naukę lub sztukę

Przygotowałam i prowadzę zajęcia popularyzujące naukę:

- dla uczniów Liceum Ogólnokształcącego XI i XII w Olsztynie („Ściana komórkowa”, „Jądro komórkowe, mitoza”, „Plastydy”) – od 2017 roku;
- w ramach Olsztyńskich Dni Nauki i Sztuki oraz Nocy Biologów (“Świat w skali mikro”, „Świat pod mikroskopem”; Obserwacje komórek w cyklu komórkowym - zajęcia online, "Osmoza i toniczność") – od 2019 roku;
- w ramach Dnia Biologa i Biotechnologa: wykłady „Podróż do wnętrza komórki” i „Tajemnice mitozy – podstawowego procesu życia” oraz warsztaty pt.: „Komórki roślinne pod mikroskopem” (2021 rok);
- w ramach dwóch edycji Uniwersytetu Młodego Odkrywcy, realizowanego przez Wydział Biologii i Biotechnologii UWM w Olsztynie (od 2017 do 2019);
- dla uczniów ze szkół średnich z Litwy nt. „Komórka w mikroskopach świetlnych i elektronowych” (2013 rok);
- dla uczniów z Ukrainy (2017 rok);
- dla uczniów z Litwy w ramach zadań Oddziału Warmińsko-Mazurskiego Stowarzyszenia "Wspólnota Polska" (2018 rok).

Ponadto brałam udział w tworzeniu filmu promującego Katedrę Fizjologii, Genetyki i Biotechnologii Roślin dostępnym na platformie YouTube od 2021 roku: [Katedra Fizjologii, Genetyki i Biotechnologii Roślin - Wydział Biologii i Biotechnologii UWM](#).

Udzieliłam również wywiadu dla Wiadomości Uniwersyteckich na temat projektu Opus 18, którego byłam koordynatorem w UWM (grudzień 2023, strony 40 i 41, [Krzem, kadm i rośliny](#)).

1 grudnia 2023 roku otrzymałam **Nagrodę Zespołową II stopnia** Rektora Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie.

Byłam członkiem **Komitetu Naukowego 22. Olsztyńskich Dni Nauki i Sztuki**, organizowanych przez Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie oraz Centrum Popularyzacji Nauki i Innowacji „KORTOSFERA” (wrzesień 2024 rok).

7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.

17 listopada 2022 roku otrzymałam Nagrodę Rektora Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie za wyróżniające się publikacje naukowe wydane w 2021 roku.

19 grudnia 2023 roku otrzymałam Nagrodę Rektora Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie za wyróżniające się publikacje naukowe wydane w 2022 roku.

27 listopada 2024 roku otrzymałam Nagrodę Rektora Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie za wyróżniające się publikacje naukowe wydane w 2023 roku.

Pełniłam funkcję promotora pomocniczego w zakończonym postępowaniu Pana dr. Adriana Duby. Praca doktorska, pt. „Zdrowotność wybranych gatunków rodzaju *Triticum* L. jako wynik morfologicznych i genetycznych mechanizmów obronnych roślin”, była realizowana na Wydziale Kształtowania Środowiska i Rolnictwa, pod kierunkiem Pani prof. dr hab. Urszuli Wachowskiej. Data obrony: 25-09-2020.

Obecnie pełnię funkcję promotora pomocniczego w trwającym postępowaniu Pana mgr. Mateusza Cichorka. Praca doktorska pt. „Udział krzemu w zwiększaniu tolerancji roślin uprawnych na kadm” jest realizowana na Wydziale Biologii i Biotechnologii, pod kierunkiem Pana prof. dr. hab. Lesława B. Lahuty. Planowany termin obrony 2025 rok.

Od października 2024 pełnię również rolę promotora pomocniczego w postępowaniu Pani mgr inż. Moniki Komorowskiej-Trepner. Roboczy temat pracy doktorskiej brzmi: „Wpływ nanocząstek tlenku krzemu na tolerancję grochu siewnego (*Pisum sativum* L.) na kadm”. Praca jest realizowana na Wydziale Biologii i Biotechnologii, pod kierunkiem Pana prof. dr. hab. Lesława B. Lahuty.

.....

(podpis wnioskodawcy)