

Wojciech Tołoczko¹  • Anna Wyrwicka-Drewniak²  • Rafał Spała³¹ Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych, Katedra Geografii Fizycznej² Uniwersytet Łódzki, Wydział Biologii i Ochrony Środowiska, Katedra Fizjologii i Biochemii Roślin³ Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych, student kier. GeoinformacjaE-mail: wojciech.toloczko@geo.uni.lodz.pl; anna.wyrwicka@biol.uni.lodz.pl; rafal.spala@edu.uni.lodz.pl

Przydatność biotestu Phytotoxkit do badania zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi

Usefulness of the Phytotoxkit biotest for testing soil contamination with heavy metals

Zarys treści

Zrealizowano eksperyment, w którym badano odporność czterech gleb na zanieczyszczenie ich metalami ciężkimi. Miejsca poboru próbek były zlokalizowane w odległości ok. 40 m od drogi ekspresowej S8. Założono, że droga ekspresowa będzie w przyszłości potencjalnym ogniskiem zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi. Badano jedną glebę łąkową i trzy gleby orne. W badaniach podjęto próbę weryfikacji stopni zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi wyznaczonych przez IUNG. Aby ustalić odporność gleb, wykorzystano biotest Phytotoxkit. Badano, jak roztwory glebowe o różnej zawartości kationów metali ciężkich (cynk, kadm, nikiel, miedź i ołów), oddziałują na wzrost rzeżuchy w fazie jej kiełkowania. Na podstawie pomiarów długości korzeni rzeżuchy, po 3 dniach stwierdzono wyraźne zahamowania wzrostu wywołane przez różne stężenia metali ciężkich w glebie. Przeprowadzono również badania składu granulometrycznego, odczynu gleb oraz zawartości węgla organicznego. Uziarnienie wszystkich badanych gleb było do siebie zbliżone i zdefiniowano je jako piaski gliniaste. Gleba pochodząca z użytku zielonego wykazała największą zawartość węgla organicznego i odczyn zasadowy. Prawdopodobnie dlatego wykazała największą odporność na zanieczyszczenia metalami ciężkimi. Test Phytotoxkit wskazał, że zahamowanie wzrostu rzeżuchy było w niej zdecydowanie mniejsze niż w przypadku gleb z gruntów ornym. Przyczyniły się do tego wysoka zawartość węgla organicznego oraz korzystny zasadowy odczyn gleby. Mniejszą odporność uzyskano w badaniu gleb z pola uprawnego, które charakteryzowały się niższą zawartością węgla organicznego oraz lekko kwaśnym odczynem. Wynik badań potwierdził dużą przydatność biotestu Phytotoxkit do oceny zanieczyszczeń gleb metalami ciężkimi.

Słowa kluczowe Biotest Phytotoxkit, metale ciężkie, odporność gleb.

Abstract

An experiment was carried out to test the resistance of four soils to contamination with heavy metals. The sampling sites were located approximately 40 m from the S8 expressway. It was assumed that the expressway would be a potential source of soil contamination with heavy metals in the future. One meadow soil and three arable soils were tested. The research attempted to verify the degrees of soil contamination with heavy metals determined by the IUNG. To determine soil resistance, the Phytotoxkit biotest was used. It was investigated how soil solutions with different contents of heavy metal cations (zinc, cadmium, nickel, copper and lead) affect the growth of cress in the germination phase. Based on measurements of the length of cress roots after 3 days, clear growth inhibition was found caused by various concentrations of heavy metals in the soil. The granulometric composition, soil reaction and organic carbon content were also examined. The grain size of all tested soils was similar and can be described as clayey sands. The soil from grassland had the highest organic carbon content and alkaline reaction. This is probably why it showed the greatest resistance to heavy metal contamination. The Phytotoxkit test showed that the inhibition of cress growth was much lower than in the case of soils from arable land. The high content of organic carbon and the favorable alkaline reaction of the soil contributed to this. Lower resistance was obtained in the study of soils from arable fields, which were characterized by the lowest organic carbon content and slightly acidic reaction. The research results confirmed the great usefulness of the Phytotoxkit biotest for assessing soil contamination with heavy metals.

Keywords Biotest Phytotoxkit, heavy metals, soil resistance.

1. Wprowadzenie

Rozwój wielu sektorów gospodarki oraz postępująca urbanizacja skutkuje przedostawaniem się do środowiska różnych zanieczyszczeń, w tym metali ciężkich. Pierwiastki te trafiają do gleby, gdzie kumulują się i po osiągnięciu odpowiednio wysokich stężeń oddziałują niekorzystnie na rozwój wielu roślin. Spożywanie produktów roślinnych

zawierających metale ciężkie, stanowi zagrożenie dla zdrowia zwierząt i ludzi. Dlatego istotny jest monitoring gleb pod kątem występujących w nich zanieczyszczeń i ustalanie dopuszczalnych progów zawartości zanieczyszczeń (Kabata-Pendias i in. 1995; IUNG 1999; IUNG 2017). Należy zaznaczyć, że różne typy gleb charakteryzują się zmienną odpornością, gdyż posiadają odmienne właściwości fizyczne i chemiczne. Niektóre gleby skuteczniej wiążą

metale ciężkie, dając tym samym bezpieczniejsze warunki dla rozwoju roślin.

Celem pracy było określenie odporności czterech wybranych gleb w gminie Lubochnia na ich zanieczyszczenie metalami ciężkimi. Miejsca poboru próbek były zlokalizowane wzdłuż drogi ekspresowej S8, będącej istotnym ogniskiem zanieczyszczeń dla sąsiadujących z nią gruntów. W badaniu wykorzystano biotest Phytotoxkit, który umożliwia ocenę wpływu metali ciężkich na wzrost roślin w fazie ich kiełkowania. Oczekiwano informacji, jaką ilość zanieczyszczeń będzie mogła przyjąć gleba, aby nie wpływało to niekorzystnie na rozwój roślin. Zbadano w tych glebach także uziarnienie, odczyn oraz zawartość węgla organicznego.

2. Ogniska zanieczyszczeń

Metale ciężkie w glebie mogą mieć pochodzenie naturalne lub antropogeniczne. Głównym naturalnym źródłem jest skała macierzysta, z której wykształca się gleba. Za przykład mogą posłużyć występujące w Polsce gleby serpentynitowe, o podwyższonej zawartości niklu lub gleby powstałe na wychodniach skał rud cynku i ołowiu na Górnym Śląsku (Siebielec i in. 2008). Także arsen występuje w glebach ornym naturalnie, ale w bardzo małych ilościach. Jednak w wielu miejscach Kotliny Kłodzkiej stwierdzono bardzo wysokie zawartości arsenu w glebie. Dotyczy to np. terenów Złotego Stoku zanieczyszczonych w wyniku działalności górniczej i przetwórstwa arsenu (Tołoczko 2020). Poza skałą macierzystą na koncentrację metali ciężkich mają wpływ także procesy glebotwórcze oraz wybuchy wulkanów (Gruca-Królikowska, Waclawek 2006). Warto zauważyć, że metale pochodzenia naturalnego występujące w związkach chemicznych mają mniejszą rozpuszczalność niż te pochodzenia antropogenicznego, zatem są mniej dostępne dla roślin. Z tego powodu nie nazywa się ich zanieczyszczeniami (Kalembasa i in. 2008; Siebielec i in. 2008).

Spośród ognisk antropogenicznych największy udział w zanieczyszczeniu gleb metalami ma szeroko rozumiany przemysł. W Polsce gałęzią przemysłu emitującą najwięcej metali ciężkich była i jest energetyka, wykorzystująca głównie węgiel kamienny i brunatny. Elektrownie i zakłady przemysłowe emitowały do atmosfery zanieczyszczenia pyłowe, które były przenoszone na duże odległości. Mogły one opadać na gleby położone nawet znacznie dalej niż 50 km od miejsca emisji (Gruca-Królikowska, Waclawek 2006). Jednak obecnie, np. PGE Elektrownia Bełchatów, znacząco ograniczyła emisję metali ciężkich i pyłów do atmosfery w porównaniu do pierwszych lat działalności w latach 80. i 90. pod koniec XX wieku. Należy wspomnieć również o nieustabilizowanych hałdach, zwalówiskach i innych składowiskach odpadów przemysłowych. Brak pokrywy roślinnej na terenach składowania ułatwia przedostawanie się metali ciężkich do okolicznych gleb, głównie dzięki erozji wodnej i wietrznej (Siebielec i in. 2008).

Badano także zawartość i formy łatwo rozpuszczalnych metali ciężkich w glebach 6 dawnych ośrodków górniczych w Sudetach i na Przedgórzu Sudeckim. Stwierdzono, że materiał hałd górniczych zawiera znaczne ilości As oraz Pb, Cu, Zn, Ni i Cr, zależnie od rodzaju eksploatowanych rud. Także gleby uznane za naturalne w sąsiedztwie obiektów górniczych wykazują niekiedy znaczne zawartości metali ciężkich. W większości badanych gleb aktualna rozpuszczalność metali pozostaje niska, ale w niektórych przypadkach stwierdzono wyjątkowo wysoki udział form mobilnych metali, co powinno podlegać dalszym badaniom. Stwierdzono, że formy metali, badane metodą sekwencyjnej ekstrakcji, wykazują duże zróżnicowanie, zależnie od rodzaju obiektu i rodzaju metalu (Karczevska i in. 2007).

Drugim ogniskiem zanieczyszczeń jest rolnictwo, a dokładniej zabiegi agrotechniczne związane z nawożeniem mineralnym i organicznym, a także wapnowanie gleby. Nawozy, obok istotnych dla roślin substancji i składników, mogą niekiedy zawierać znaczne ilości metali ciężkich, które kumulują się w glebie (Gruca-Królikowska, Waclawek 2006). Obecnie znaczenie i skala negatywnego oddziaływania zabiegów agrotechnicznych stopniowo maleje, w związku z przepisami, które regulują zawartość metali w nawozach. Przykładowo, niegdyś problemem było stosowanie nawozów fosforowych, gdyż niektóre składniki do ich wytwarzania zawierały dosyć wysokie ilości kadmu. Metal ten dostawał się również do gleb użytkowanych rolniczo w związku ze stosowaniem wapna odpadowego i fosfogipsu (Siebielec i in. 2008). Środki ochrony roślin również miały związek z zanieczyszczeniem gleb metalami ciężkimi. Należy tu głównie wspomnieć o pestycydach, w skład których wchodziły dawniej związki arsenu, miedzi, rtęci, cynku i ołowiu. Związki miedzi i cynku można jeszcze spotkać w fungicydach (Gruca-Królikowska, Waclawek 2006). Innym problemem są ścieki komunalne i przemysłowe, odprowadzane do wód i ziemi. Zawarte w nich metale ciężkie przyczyniają się do zanieczyszczenia i w konsekwencji degradacji gleb w dolinach rzecznych (Trawczyńska i in. 2009). Metale ciężkie wprowadzane do wód powierzchniowych ulegają przeważnie strącaniu, sedymentacji i akumulacji w osadach dennych, w których można zaobserwować znacznie większą ich zawartość niż w toni wodnej. Zbiorniki zaporowe, szczególnie nizinne takie, jak Zbiornik Włocławski, należą do akwenów wodnych ulegających bardzo szybkiemu zamulaniu. Materiał ten w zależności od rodzaju i charakteru zlewni rzeki zawiera znaczne ładunki zanieczyszczeń organicznych (np. WWA i pestycydy) i nieorganicznych (np. metale ciężkie), które ulegają deponowaniu i transformacji w osadach, a następnie na skutek remobilizacji stanowią zagrożenie dla jakości wody (Bojakowska i in. 2000; Kalembasa i in. 2001; Gałka, Wiatkowski 2010a, 2010b; Pakuła i in. 2012; Urbaniak i in. 2014a).

Kolejnym ogniskiem zanieczyszczeń jest transport. Wszystkie jego rodzaje odpowiadają za emisję metali ciężkich, ale pod tym względem, zwłaszcza w kontekście zanieczyszczenia gleb, największy udział ma transport dro-

gowy (Jagodzińska, Rydzek 2019). Metale takie, jak ołów, miedź, cynk, nikiel, kadm i chrom przedostają się do środowiska w związku ze: spalaniem paliw, korozją pojazdów i zużywaniem się części samochodowych, ścieraniem opon, ścieraniem okładzin klocków hamulcowych, wyciekami paliwa, smarów i olejów, a także niszczeniem nawierzchni dróg. Zawartość metali ciężkich w glebie w dużej mierze uzależniona jest od gęstości sieci komunikacyjnej, natężenia ruchu drogowego oraz od odległości od jezdni. Najbardziej narażone są gleby położone blisko krawędzi jezdni, gdyż zanieczyszczenia pyłowe i gazowe osadzają się głównie w strefie do 50 m od drogi. Maksymalny zasięg występowania zanieczyszczeń komunikacyjnych wynosi 500 m, ale zwykle ich oddziaływanie znacznie zmniejsza się po przekroczeniu 150 m (Laskowski i in. 2001; Kuziemska i in. 2017). Do nieco innych wniosków doszła K. Czarnowska i in. (2002) – „zanieczyszczenie cynkiem, ołowiem i miedzią gleb uprawnych na terenach otwartych przyległych do tras komunikacyjnych sięga co najmniej na odległość do 50 m. Jednak nie zaobserwowano jednoznacznej prawidłowości dotyczącej stopniowego zmniejszania się ilości pierwiastków śladowych w glebie wraz z oddalaniem się od drogi”. Pozostałe rodzaje transportu w zdecydowanie mniejszym stopniu oddziałują na środowisko.

Z transportem kolejowym związane jest zużywanie olejów smarnych i płynów kondensatorowych, zużywanie szyn i hamulców, magazynowanie i przetładunek paliw oraz surowców. Metale ciężkie szczególnie związane z tym sektorem transportu to miedź, mangan, a także cynk. W przypadku transportu lotniczego zagrożone są gleby położone w pobliżu lotnisk. Paliwo lotnicze (inaczej nafta lotnicza) zawiera śladowe ilości metali ciężkich, np. ołowiu. Metale, takie jak cynk, molibden, antymon, miedź i bar wchodzi w skład pyłu powstałego przez ścieranie nawierzchni lotniska, a także ścieranie opon i tarcz hamulcowych w trakcie kołowania. Emisje spowodowane przez transport wodny mają znikome znaczenie w przypadku zanieczyszczenia gleb (Jagodzińska, Rydzek 2019).

Należy też wspomnieć o ściekach komunalnych. Wysoka zawartość metali w osadach ściekowych jest w znacznej mierze wynikiem udziału ścieków przemysłowych w ogólnej masie ścieków miejskich, ale ścieki bytowe również mogą zawierać tego rodzaju zanieczyszczenia. Osady ściekowe z oczyszczalni mogą być wykorzystywane w rolnictwie jako nawozy, jednak wtedy istnieje ryzyko przedostania się do gleby również szkodliwych substancji (Sumorok i in. 2007; Gawdzik 2012; Urbaniak i in. 2014b). Z tego powodu powstały różne uregulowania prawne dotyczące stosowania osadów ściekowych w rolnictwie. Zmniejszają one ryzyko przedostawania się do gleby zanieczyszczeń pod warunkiem, że są dokładnie przestrzegane. Szacuje się że około 60% osadów ściekowych produkowanych w Polsce spełnia wymagania zawartości metali śladowych dla stosowania w rolnictwie (Nowak i in. 2002; Siebielec i in. 2008).

3. Oddziaływanie metali ciężkich na rośliny, zwierzęta i ludzi

Umownie, metale ciężkie to pierwiastki o gęstości właściwej większej od $4,5 \text{ g/cm}^3$, które w reakcjach chemicznych wykazują silną tendencję do oddawania elektronów, czyli występują w glebie w postaci prostych kationów. Rośliny pobierają je przez system korzeniowy, ale również przez blaszki liściowe. Poszczególne części roślin zawierają różne ilości metali. Zazwyczaj ich zawartość zmniejsza się w kolejności: korzenie > liście > łodyga > kwiaty > nasiona. Na zawartość metali ciężkich wpływ ma gatunek rośliny. Najwięcej zanieczyszczeń gromadzą: sałata, kapusta, buraki, marchew, szpinak, pietruszka, ziemniaki. Z kolei pomidory, ogórki, warzywa strączkowe i dyniowate oraz owoce również zatrzymują metale, ale w mniejszych ilościach. Na podwyższoną ich zawartość narażone są również zboża i powstające z nich produkty (Ociepa-Kubicka, Ociepa 2012).

Szkodliwe działanie metali ciężkich na rośliny przejawia się m.in. poprzez zmiany struktury komórek, ograniczenie pobierania wody i składników mineralnych z gleby, zaburzenia ich procesów fizjologicznych, takich jak fotosynteza, transpiracja lub metabolizm azotowy. Prowadzi to do zmian morfologicznych, chlorozy, zasychania liści i generalnie do zahamowania wzrostu (Urbaniak i in. 2017; Mierzejewska i in. 2022). Metale ciężkie dodatkowo oddziałują negatywnie na funkcjonowanie mikroorganizmów glebowych, odpowiedzialnych za rozkład i przemianę materii organicznej. Konsekwencją tego jest zmniejszenie odporności na choroby i zwiększenie dostępności zanieczyszczeń dla roślin. Metale, takie jak arsen, rtęć, ołów czy kadm są przykładem wyjątkowo toksycznych już w niewielkich stężeniach, jednak warto wspomnieć o tym, że niektóre pierwiastki śladowe (Mn, Cu, Zn, Mo) są niezbędne dla rozwoju roślin (Ociepa-Kubicka, Ociepa 2012). Miedź i cynk wchodzi w skład wielu enzymów, biorą udział w ważnych procesach fizjologicznych oraz zwiększają odporność na choroby. Ich korzystne działanie jest jednak uwarunkowane odpowiednim stężeniem – zarówno niedobór, jak i nadmiar jest szkodliwy dla roślin (Kabata-Pendias, Szteke 2012).

W przypadku ludzi i zwierząt również można mówić o metalach zbędnych i niezbędnych. Podział metali jest tutaj podobny jak w przypadku roślin. Metale zbędne są bardziej niebezpieczne dla ludzi i organizmów zwierzęcych niż dla roślin, natomiast metale funkcjonalne w nadmiernej ilości szkodzą bardziej roślinom niż człowiekowi i zwierzętom (Ociepa-Kubicka, Ociepa 2012). Wcześniej wspomniane miedź i cynk wchodzi w skład licznych enzymów i uczestniczą w wielu procesach biologicznych, dlatego istotne jest dbanie o odpowiednią zawartość tych pierwiastków w organizmie (Kabata-Pendias, Szteke 2012).

Metale ciężkie do organizmów ludzi i zwierząt mogą dostawać się na trzy sposoby. Najczęściej przedostają się drogą pokarmową, poprzez spożywanie produktów roślinnych lub zwierzęcych. Drugim sposobem jest wdychanie

zanieczyszczeń z powietrza, natomiast trzeci sposób to wchłanianie przez skórę (gruczoły łojowe, potowe i mieszki włosów). Po przedostaniu się do organizmu, metale kumulują się, zwłaszcza w nerkach, wątrobie i trzustce. Stwierdzone jest również znaczące odkładanie w kościach, mózgu i mięśniach. Pierwiastki te kumulują się stopniowo, a skutki zdrowotne ich obecności mogą ujawnić się po wielu latach (Ociepa-Kubicka, Ociepa 2012).

4. Odporność gleb i roślin na zanieczyszczenie metalami ciężkimi

Dostępność metali ciężkich dla roślin zależy od właściwości fizycznych (uziarnienie) oraz chemicznych gleb (zawartość substancji organicznej, odczyn oraz zawartość mikro- i makroelementów), ale także od indywidualnych mechanizmów obronnych poszczególnych gatunków roślin. Istotne jest również stężenie pierwiastka i jego forma występowania. Im większa jest zawartość w glebie przyswajalnych form metali ciężkich, tym więcej jest ich pobieranych przez roślinę. Metale mogą jednak występować w wielu formach, które mogą być łatwo lub trudno dostępne dla roślin. Najszybciej pobierane są wolne jony metali z roztworu glebowego, z kolei te występujące w formie trudno rozpuszczalnych soli, kompleksów mineralno-organicznych lub kompleksów chemicznych pobierane są wolniej (Laskowski, Tołoczko 2001; Gruca-Królikowska, Waćławek 2006).

Najbardziej podatne na degradację są gleby lekkie, o bardzo dużej zawartości frakcji piasków oraz gleby średnie wytworzone z piasków gliniastych lekkich. Wykazują one niewielką pojemność sorpcyjną, z powodu niewielkiej zawartości najdrobniejszych frakcji, co wiąże się z niedoborem składników pokarmowych (Laskowski, Tołoczko 1995). Gleby lekkie wykazują porowatość większą od 45%, co powoduje zubożenie takiej gleby w wodę w całym profilu (Tołoczko 2019). Gleby cięższe, o dużej zawartości ilów i koloidów, wykazują dużą pojemność sorpcyjną. Są zasobniejsze w składniki pokarmowe i jednocześnie wzrasta ich odporność (Laskowski, Tołoczko 1998). Gleby lekkie cechują się mniejszymi stężeniami metali ciężkich w porównaniu do gleb cięższych, ponieważ są one łatwiej wymywane. Jednak gleby ciężkie na tyle skutecznie wiążą chemiczne pierwiastki śladowe w swoim kompleksie sorpcyjnym, że przy tej samej ich zawartości, będą je udostępniały roślinom znacznie wolniej niż gleby lekkie (a także bogate w żelazo osady dolinne, z których wykształca się gleba (Kalembasa i in. 2001; Trawczyńska, Tołoczko 2005; Tołoczko i in. 2009).

Glebową materią organiczną również ma wpływ na ograniczanie pobierania metali ciężkich przez rośliny, są one bowiem unieruchamiane przez makromolekularne koloidy organiczne (Gruca-Królikowska i Waćławek 2006). Substancje humusowe poziomów próchnicznych wykazują od 2 do nawet 30 razy większą pojemność sorpcyjną niż koloidy mineralne. Nawet niewielkie różnice w zawartości próchnicy glebowej pomiędzy różnymi glebami, mogą mieć duże znaczenie dla ich żyzności. Glebowe substancje

organiczne mają bardzo korzystny wpływ na szereg właściwości fizycznych (przyczyniają się do tworzenia agregatów glebowych, co poprawia warunki wodno-powietrzne), chemiczne (stabilizują odczyn gleby i procesy oksydacyjno-redukcyjne) oraz biologiczne gleby (Becher i in. 2022).

Biodostępność metali ciężkich w glebach w dużym stopniu uzależniona jest od ich odczynu i wzrasta wraz z obniżaniem się odczynu gleb. Dochodzi do powolnego rozpuszczania soli oraz tlenków żelaza, glinu i manganu oraz uwalniania metali ciężkich z minerałów pierwotnych i wtórnych. Jednym z najtrudniej unieruchamialnych, a przez to najbardziej biodostępnych metali jest kadm, który podlega mobilizacji przy wartości pH 6,5 (Kabata-Pendias, Pendias 2010).

Stopniowy wzrost zakwaszenia prowadzi do uruchomienia innych metali – cynku, niklu, manganu, miedzi, ołowiu, rtęci. Istotne jest więc wapnowanie gleby, aby nie ulegała ona zbytniemu zakwaszeniu. Należy jednak stosować odpowiednie dawki nawozu, gdyż one same w sobie również zawierają pewne ilości metali ciężkich (Gruca-Królikowska, Waćławek 2006). Odczyn gleby wykazuje duży wpływ na jej urodzajność. Należy zauważyć, że dla wielu roślin uprawnych istnieją wskazania najbardziej odpowiednich przedziałów pH gleby. W ich granicach, zapewniony jest roślinom optymalny rozwój, a po niekontrolowanym wzroście zakwaszenia gleb następuje spadek plonu. Odczyn obojętny lub lekko kwaśny (pH 6,0–7,2) jest najbardziej optymalny dla większości roślin uprawnych, choć takie gatunki, jak lucerna, buraki cukrowe, rzepak, jęczmień czy pszenica preferują lekko zasadowy odczyn gleb (Lazar 1976).

Na zawartość metali ciężkich w roślinach wywiera wpływ optymalna ilość mikro- i makroelementów w glebie. Niedobór w glebie fosforu, ale także mikroelementów takich, jak bor, mangan, miedź, cynk, molibden i żelazo prowadzi do nadmiernych akumulacji metali ciężkich w roślinach. Z kolei zwiększona zawartość potasu lub azotu w formie amonowej NH_4^+ będzie powodować zwiększoną dostępność metali ciężkich dla roślin (Gruca-Królikowska, Waćławek 2006). Warto też wspomnieć o tym, że obecność w glebie różnych pierwiastków śladowych może prowadzić do antagonistycznych lub synergistycznych interakcji między nimi. Za przykład antagonizmu może posłużyć interakcja między manganem i niklem a kadmem, kiedy zwiększona zawartość tych dwóch pierwszych metali ciężkich ogranicza pobieranie kadmu przez rośliny (Kabata-Pendias, Szteke 2012).

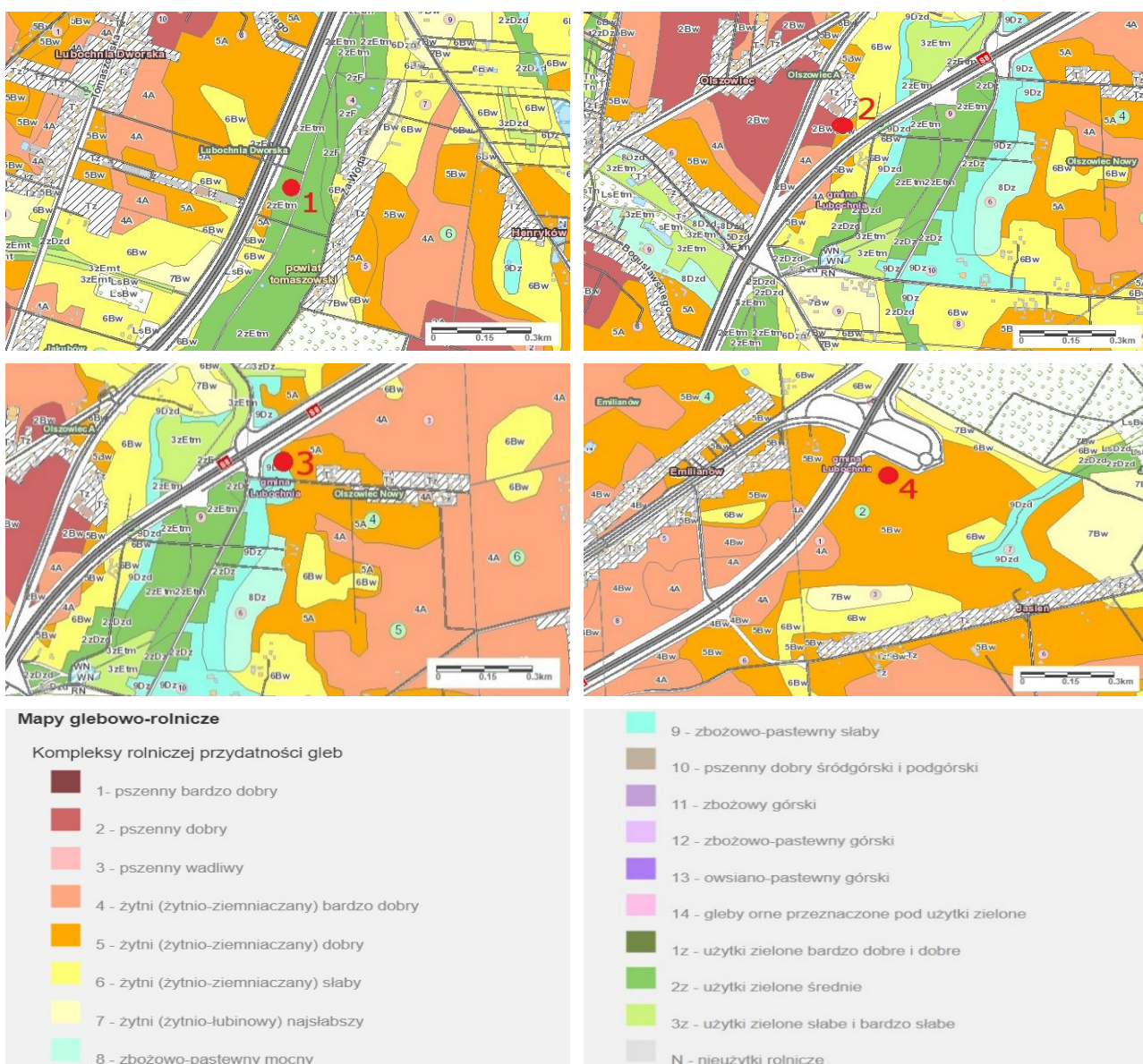
Roślinność na obszarach metalonośnych, zarówno tych naturalnych, jak i antropogenicznych jest uboga, co świadczy o słabej tolerancji na zanieczyszczenie. Na naturalnych terenach metalonośnych w toku ewolucji wykształciły się jednak specyficzne gatunki, często będące endemitami, które zaadaptowały się do wysokich stężeń metali w glebach. Za przykład może posłużyć *Berkheya coddii*, roślina zdolna do hiperakumulacji niklu, rosnąca na glebach serpentynitowych w Zimbabwie i Południowej Afryce. Potwierdzono dwa różne mechanizmy ochronne. Jeden z nich polega na unikaniu pobierania metali z gleby.

Rośliny mogą zapobiegać wchłanianiu metali na kilka sposobów: modyfikują odczyn w ryzosferze, wydzielają kwasy organiczne przez korzenie, które wiążą metale w postaci trudno rozpuszczalnych soli, wydzielają śluz w szczytowych partiach korzeni, który stanowi barierę mechaniczną, wykorzystują mikoryzę, czyli strzępki grzybnia, która wiąże metale ciężkie. Drugi mechanizm polega na pobieraniu i akumulacji zanieczyszczeń w określonych częściach. Niektóre rośliny akumulują metale w korzeniach, tym samym ograniczając ich zawartość w pędach. Inne natomiast gromadzą metale właśnie w częściach nadziemnych. Takie rośliny zdołały wykształcić mechanizmy detoksykacyjne, umożliwiające utrzymywanie niskich stężeń zanieczyszczeń w cytoplazmie, w obszarach aktywnych metabolicznie. Rośliny gromadzące metale w pędach proporcjonalnie do ich zawartości w glebie nazywa

się biowskaźnikami, a te pobierające metale w nadzwyczaj dużych ilościach określa się mianem hiperakumulatorów (Siwek 2008).

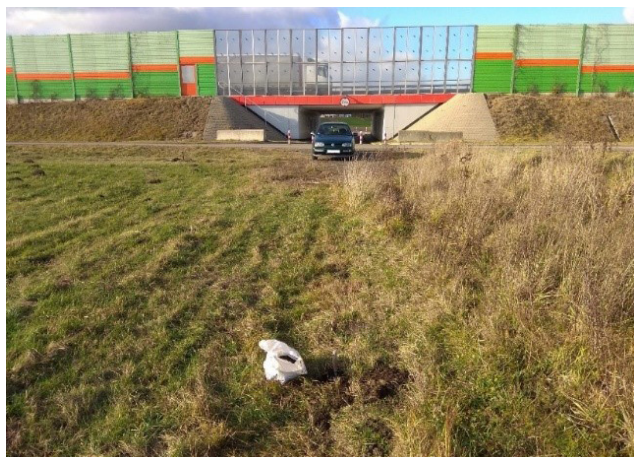
5. Lokalizacja stanowisk badawczych

Miejsca poboru próbek glebowych zostały zlokalizowane w gminie Lubochnia (rys. 1), wzdłuż drogi ekspresowej S8. Do szczegółowych badań wytypowano 4 gleby, które realnie narażone są obecnie i w przyszłości na zanieczyszczenie metalami ciężkimi. Najbardziej narażone są gleby w bezpośrednim sąsiedztwie szlaku komunikacyjnego, a im dalej od drogi położona jest gleba, tym mniejsze będzie prawdopodobieństwo osadzenia się na niej zanieczyszczeń pyłowych. Z tego powodu próbki zostały pobrane w odległości około 40 m od krawędzi jezdni.



Rys. 1. Lokalizacja miejsc poboru próbek glebowych (1–4) na tle mapy glebowo-rolniczej (oprac. własne na podstawie Geoportalu Województwa Łódzkiego – <https://www.lodzkie.pl>)

Fig. 1. Location of soil sampling sites (1–4) against the background of the soil and agricultural map (own study based on Geoportal of the Łódź Voivodeship – <https://www.lodzkie.pl>)



Gleba nr 1 / Soil no. 1



Gleba nr 2 / Soil no. 2



Gleba nr 3 / Soil no. 3



Gleba nr 4 / Soil no. 4

Rys. 2. Gleby nr 1–4 w pobliżu drogi S8 w gminie Lubochnia

Fig. 2. Soils no. 1–4 near the S8 road in the Lubochnia commune

Badano grunty orne, z których pobrano trzy próbki (gleba nr 2, 3 i 4) (rys. 1 i 2). Dodatkowo pobrano jedną próbkę pochodzącą z użytku zielonego (gleba nr 1) (rys. 1 i 2). Założono, że będą to gleby różnych klas bonita-

cyjnych i różnych kompleksów przydatności rolniczej. Poniżej przedstawiono krótką charakterystykę gleb według informacji pochodzących z portalu map glebowo-rolniczych, na geoportalu województwa łódzkiego.



Gleba nr 1

Typ gleby: mułowa, torfowo-mułowa (Etm)
Kompleks przydatności rolniczej: użytki zielone średnie (Zz)
Klasa bonitacyjna: łąka średniej jakości (IV)
Lokalizacja (współrzędne): 51°36'01"N, 20°03'32"E



Gleba nr 2

Typ gleby: brunatna wylugowana (Bw)
Kompleks przydatności rolniczej: pszenno dobry (2)
Klasa bonitacyjna: gleby orne średnio dobre (IIIb)
Lokalizacja (współrzędne): 51°36'36"N, 20°03'56"E



Gleba nr 3

Typ gleby: czarna ziemia zdegradowana (Dz)

Kompleks przydatności rolniczej: zbożowo pastewny słaby (9)

Klasa bonitacyjna: gleby orne słabe (V)

Lokalizacja (współrzędne): 51°36'44"N, 20°04'27"E



Gleba nr 4

Typ gleby: brunatna wylugowana (Bw)

Kompleks przydatności rolniczej: żytni dobry (5)

Klasa bonitacyjna: gleby orne średniej jakości, gorsze (IVb)

Lokalizacja (współrzędne): 51°37'23"N, 20°05'45"E

Rys. 3. Klasyfikacja badanych gleb

Fig. 3. Classification of the tested soils

6. Metodyka badań

Do badań wykorzystano poziomy próchniczne gleb, które są przerośnięte drobnymi korzeniami roślin i są najstojniejsze dla ich rozwoju. Próbkę pobierano z głębokości od 4 do 12 cm p.p.t. Masa zbiorczych próbek gleb wynosiła ponad 3 kg, co po wykonaniu preparatyki miało umożliwić przeprowadzenie co najmniej 20 testów Phytotoxkit oraz pozostałe badania laboratoryjne. Próbkę gleb zostały

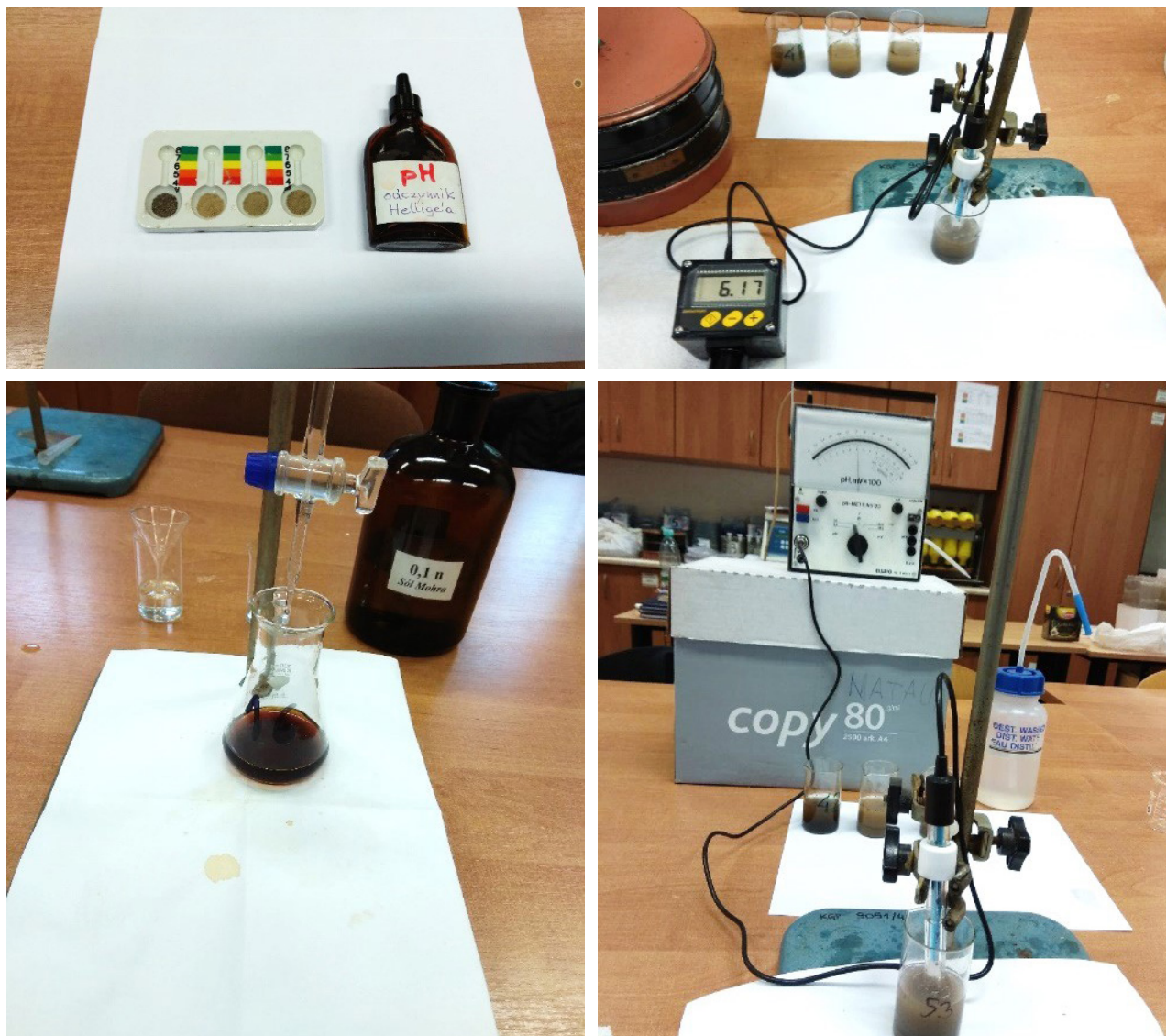
przewiezione do laboratorium Wydziału Nauk Geograficznych UŁ i wysuszone (rys. 4).

W czterech próbkach, po preparatyce oznaczono skład granulometryczny, odczyn gleb i zawartość węgla organicznego (rys. 4 i 5). Uziarnienie oznaczono metodą areometryczno-sitową Casagrande'a w modyfikacji Prószyńskiego, odczyn gleb kolorymetrycznie płynem Hellige'a i potencjometrycznie dwoma miernikami z tą samą (jedną) elektrodą zespoloną oraz zawartość Corg metodą Tiurina (Gaşior i in. 2013).



Rys. 4. Suszenie gleb nr 1–4 i oznaczanie składu granulometrycznego

Fig. 4. Drying of soils no. 1–4 and determination of granulometric composition



Rys. 5. Oznaczanie odczynu gleb i zawartości węgla organicznego
 Fig. 5. Determination of soil reaction and organic carbon content

Założenia eksperymentu. Do zanieczyszczenia gleb w ramach testu Phytotoxkit wybrano pięć metali ciężkich: cynk, kadm, miedź, nikiel i ołów. Stężenia tych metali ustalono na podstawie opracowanych przez Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa (WYTYCZNE IUNG) granicznych zawartości metali śladowych w powierzchniowej warstwie gleb (tab. 1).

Graniczne zawartości metali śladowych w poziomie próchnicznym odpowiadają sześciu stopniom (od 0 do V) zanieczyszczenia gleby. Dla poszczególnych stopni IUNG zaleca określone użytkowanie rolnicze gleb – gleby niezanieczyszczone (stopień 0) mogą być swobodnie wykorzystywane dla wszystkich upraw ogrodniczych i rolniczych, z kolei gleby bardzo silnie zanieczyszczone (stopień V) powinny być wyłączone z produkcji rolniczej i poddane rekultywacji. Należy zaznaczyć, że uwzględniono odmiennosc gleb pod względem ich odczynu, składu granulometrycznego oraz zawartości substancji organicznej. Właściwości te są istotne z punktu widzenia zawartości metali ciężkich

w glebach oraz ich dostępności dla roślin. Na tej podstawie IUNG wyznaczył trzy grupy gleb (tab. 2).

Pierwszym krokiem było ustalenie do której grupy należą gleby wykorzystane w pracy. Na podstawie wyników wcześniej opisanych analiz laboratoryjnych stwierdzono, że wszystkie cztery gleby należą do grupy a. Następnie wytypowano dawki metali, na podstawie stopni zanieczyszczenia. Dla każdego metalu wykorzystano dawkę 10-krotnie mniejszą niż podane w tabeli wartości dla II, III oraz IV stopnia. Dawka została zmniejszona, ponieważ podane w tabeli graniczne zawartości metali odnoszą się do ich zawartości w 1 kg gleby, natomiast w jednej płytce testowej Phytotoxkit wykorzystuje się 100 g gleby. Wykorzystano następujące ilości metali: ołów – 10 mg (II stopień), 50 mg (III stopień) i 250 mg (IV stopień); cynk – 30 mg, 70 mg, 300 mg; miedź – 5 mg, 15 mg, 30 mg; nikiel – 5 mg, 10 mg, 40 mg; kadm – 0,2 mg, 0,3 mg, 0,5 mg. Zdecydowano się pominąć dwa pierwsze stopnie (0 oraz I), ponieważ stężenia zanieczyszczeń są na tyle niskie, że prawdopodobnie

Tabela 1. Graniczne zawartości metali śladowych (mg/kg) w powierzchniowej warstwie gleb (0–20 cm), odpowiadające różnym stopniom jej zanieczyszczenia (wartości zweryfikowane) (wytyczne IUNG do oceny stopnia zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi – http://karnet.up.wroc.pl/~kabala/Wytyczne_IUNG.pdf)

Table 1. Limit contents of trace metals (mg/kg) in the surface layer of soil (0–20 cm), corresponding to various degrees of its contamination (verified values) (IUNG guidelines for assessing the degree of soil contamination with heavy metals – http://karnet.up.wroc.pl/~kabala/Wytyczne_IUNG.pdf)

Metal	Grupa gleb	Stopień zanieczyszczenia gleb					
		0	I	II	III	IV	V
Ołów (Pb)	a	30	70	100	500	2500	>2500
	b	50	100	250	1000	5000	>5000
	c	70	200	500	2000	7000	>7000
Cynk (Zn)	a	50	100	300	700	3000	>3000
	b	70	200	500	1500	5000	>5000
	c	100	300	1000	3000	8000	>8000
Miedź (Cu)	a	15	30	50	150	300	>300
	b	25	50	80	100	500	>500
	c	40	70	100	150	750	>750
Nikiel (Ni)	a	10	30	50	100	400	>400
	b	25	50	75	150	600	>600
	c	50	75	100	300	1000	>1000
Kadm (Cd)	a	0,3	1,0	2	3	5	>5
	b	0,5	1,5	3	5	10	>10
	c	1,0	3,0	5	10	20	>20

Stopień zanieczyszczenia: 0 – zawartość naturalna; I – zawartość podwyższona; II – słabe zanieczyszczenie; III – średnie zanieczyszczenie; IV – silne zanieczyszczenie; V – bardzo silne zanieczyszczenie.

Tabela 2. Grupy gleb o odmiennych parametrach, które decydują o dostępności dla roślin i zawartości metali ciężkich w glebach (wytyczne IUNG do oceny stopnia zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi – http://karnet.up.wroc.pl/~kabala/Wytyczne_IUNG.pdf)

Table 2. Groups of soils with different parameters that determine the availability for plants and the content of heavy metals in soils (IUNG guidelines for assessing the degree of soil contamination with heavy metals – http://karnet.up.wroc.pl/~kabala/Wytyczne_IUNG.pdf)

a	– gleby bardzo lekkie o małej zawartości frakcji spławialnej (<10%), niezależnie od pH – gleby lekkie (10–20% frakcji spławialnej), bardzo kwaśne (pH <4,5), kwaśne (pH 4,5–5,5) i słabo kwaśne (pH 5,6–6,5)
b	– gleby lekkie (10–20% frakcji spławialnej) odczyn obojętny (pH >6,5) – gleby średnie (20–35% frakcji spławialnej) i gleby ciężkie (>35% frakcji spławialnej), bardzo kwaśne (pH <4,5) i kwaśne (pH 4,5–5,5) – gleby mineralno-organiczne (substancje organiczne 6–10%) bez względu na pH
c	– gleby średnio ciężkie (20–35% frakcji spławialnej) i ciężkie (>35% frakcji spławialnej) słabo kwaśne (pH 5,5–6,5) lub obojętne (pH >6,5) – gleby organiczno-mineralne i organiczne (substancje organiczne >10%) bez względu na odczyn pH

nie wpłynęłyby one znacząco na wzrost roślin. Nie wykorzystano również wartości podane dla V stopnia, gdyż na pewno bardzo mocno ograniczyłyby rozwój, a nawet uniemożliwiłyby wykiełkowanie roślin.

Cztery gleby przygotowane do badań (nr 1, 2, 3 i 4) zaliczono do grupy a, wybierając ją z trzech grup gleb (a, b i c) z tabeli 2. Tak je zaklasyfikowano, ponieważ: gleba nr 1 jest glebą bardzo lekką o małej zawartości frakcji spławialnej (<10%), niezależnie od pH, zaś pozostałe gleby nr 2, 3 i 4 są to gleby lekkie (10–20% frakcji spławialnej), ale bardzo kwaśne (pH <4,5), kwaśne (pH 4,5–5,5) lub słabo kwaśne (pH 5,6–6,5). Wszystkie cztery gleby spełniają kryteria dla grupy a (tab. 2). Dlatego tabela stopni zanieczyszczeń metalami ciężkimi, dedykowana tylko dla grupy gleb a do przeprowadzenia eksperymentu wygląda następująco (tab. 3).

Do zanieczyszczenia próbek wykorzystano sole rozpuszczalne w wodzie i zawierające poszczególne metale ciężkie: trójwodny octan ołowiu (II), $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Pb} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$; siedmiowodny siarczan cynku, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; dwuwodny chlorek miedzi (II), $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; sześciowodny chlorek niklu (II), $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; ośmiowodny siarczan kadmu (II), $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$. Sporządzono z nich roztwory, które wykorzystano do zanieczyszczenia gleb (fot. 1). Przed ich przygotowaniem wykonano obliczenia mające na celu ustalenie, ile miligramów soli należy użyć, aby do roztworów trafiła odpowiednia ilość metali oraz w jaki sposób rozcieńczać roztwory. Ponieważ do 100 g suchej gleby dodawano 35 ml wodnych roztworów soli, należało obliczyć ilości mg kolejnych metali w 100 g gleby, aby uzyskać II, III oraz IV stopień jej zanieczyszczenia. Przygotowanie roztworów soli metali ciężkich wykonano następująco (tab. 4 i fot. 1).

Tabela 3a. Graniczne zawartości metali śladowych (mg/kg) w powierzchniowej warstwie gleb (0–20 cm), odpowiadające II, III i IV stopniom jej zanieczyszczenia gleb z grupy a (do eksperymentu)

Table 3a. Limit contents of trace metals (mg/kg) in the surface layer of soil (0–20 cm), corresponding to II, III and IV degrees of soil contamination from group a (for the experiment)

Metal	Grupa gleby	Stopień zanieczyszczenia gleb					
		0	I	II	III	IV	V
		[mg/kg]					
Ołów (Pb)	a	< 30	70	100	500	2500	> 2500
Cynk (Zn)	a	< 50	100	300	700	3000	> 3000
Miedź (Cu)	a	< 15	30	50	150	300	> 300
Nikiel (Ni)	a	< 10	30	50	100	400	> 400
Kadm (Cd)	a	< 0,3	1	2	3	5	> 5

Tabela 3b. Graniczne zawartości metali śladowych (mg/100 g) w powierzchniowej warstwie gleb (0–20 cm), odpowiadające II, III i IV stopniom jej zanieczyszczenia gleb z grupy a (do eksperymentu)

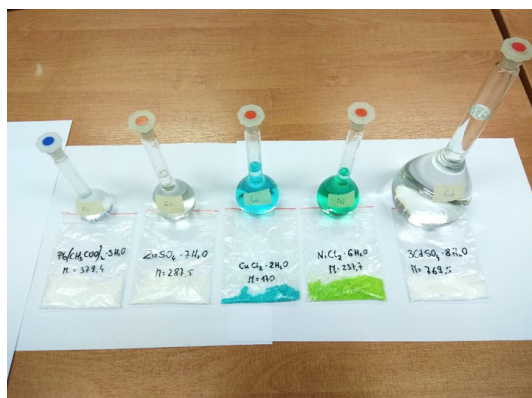
Table 3b. Limit contents of trace metals (mg/100 g) in the surface layer of soil (0–20 cm), corresponding to II, III and IV degrees of soil contamination from group a (for the experiment)

Metal	Grupa gleby	Stopień zanieczyszczenia gleb					
		0	I	II	III	IV	V
		[mg/100 g]					
Ołów (Pb)	a	< 3,0	7	10	50	250	> 250
Cynk (Zn)	a	< 5,0	10	30	70	300	> 300
Miedź (Cu)	a	< 1,5	3	5	15	30	> 30
Nikiel (Ni)	a	< 1,0	3	5	10	40	> 40
Kadm (Cd)	a	< 0,03	0,1	0,2	0,3	0,5	> 0,5

Tabela 4. Schemat sporządzania roztworów soli metali ciężkich

Table 4. Scheme of preparation of solutions of heavy metal salts

Lp.	Wzór sumaryczny stosowanej soli	Masa cząsteczkowa stosowanej soli	Pierwiastek chemiczny i jego masa atomowa	Naważka soli na roztwór bazowy	Objętość kolby miarowej z roztworem	Ilość kationu metalu w 1 ml roztworu bazowego
		[u]	[u]	[mg]	[ml]	[mg (metal)/ml]
1	$\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	379,33	Pb 207,20	2288	50	25,00
2	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	287,55	Zn 65,38	13193	100	30,00
3	$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	170,48	Cu 63,55	804	100	3,00
4	$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	237,69	Ni 58,69	1620	100	4,00
5	$3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	769,54	Cd 112,41	57	500	0,05



Fot. 1. Sole wykorzystane w badaniach ze sporządzonymi roztworami bazowymi

Pic. 1. Salts used in tests with prepared base solutions

Tabela 5. Zestawienie 15 wariantów skażenia gleby w realizowanym eksperymencie**Table 5.** List of 15 soil contamination variants in the experiment

w 10 ml roztw. baz. jest 250 mg Pb + 25 ml wody = 35 ml dodane do 100 g gleby to IV stopień
w 10 ml roztw. baz. jest 300 mg Zn + 25 ml wody = 35 ml dodane do 100 g gleby to IV stopień
w 10 ml roztw. baz. jest 30 mg Cu + 25 ml wody = 35 ml dodane do 100 g gleby to IV stopień
w 10 ml roztw. baz. jest 40 mg Ni + 25 ml wody = 35 ml dodane do 100 g gleby to IV stopień
w 10 ml roztw. baz. jest 0,5 mg Cd + 25 ml wody = 35 ml dodane do 100 g gleby to IV stopień
w 2 ml roztw. baz. jest 50 mg Pb + 33 ml wody = 35 ml dodane do 100 g gleby to III stopień
w 2,33 ml roztw. baz. jest 70 mg Zn + 32,66 ml wody = 35 ml dodane do 100 g gleby to III stopień
w 5 ml roztw. baz. jest 15 mg Cu + 30 ml wody = 35 ml dodane do 100 g gleby to III stopień
w 2,5 ml roztw. baz. jest 10 mg Ni + 32,5 ml wody = 35 ml dodane do 100 g gleby to III stopień
w 6 ml roztw. baz. jest 0,3 mg Cd + 29 ml wody = 35 ml dodane do 100 g gleby to III stopień
w 0,4 ml roztw. baz. jest 10 mg Pb + 34,6 ml wody = 35 ml dodane do 100 g gleby to II stopień
w 1 ml roztw. baz. jest 30 mg Zn + 34 ml wody = 35 ml dodane do 100 g gleby to II stopień
w 1,67 ml roztw. baz. jest 5 mg Cu + 33,33 ml wody = 35 ml dodane do 100 g gleby to II stopień
w 1,25 ml roztw. baz. jest 5 mg Ni + 33,75 ml wody = 35 ml dodane do 100 g gleby to II stopień
w 4 ml roztw. baz. jest 0,2 mg Cd + 31 ml wody = 35 ml dodane do 100 g gleby to II stopień

W oparciu o jeden roztwór bazowy (roztw. baz.) przygotowano 3x po 35 ml roztworu soli, a w nich znajdowało się tyle mg metalu, aby 100 g gleby zawierało jego ilość odpowiadającą IV, III i II stopniom zanieczyszczenia. Dla wszystkich 5 soli było to 15 roztworów o objętości 35 ml niezbędnych do skażenia 15 zważonych 100 g próbek gleby nr 1. Wykonano dla gleby nr 1 również 2 próbki odniesienia, czyli 100 g gleby + 35 ml wody. Takie postępowanie wykonano również z glebą nr 2, 3 i 4. Łącznie, dla czterech gleb (nr 1, 2, 3 i 4), wykonano 60 takich kombinacji skażonej gleby i dodatkowo 8 próbek odniesienia.

Procedura wykonania eksperymentu. Biotest Phytotoxkit służy do pomiaru stopnia zahamowania kiełkowania roślin, które w przeciągu kilku dni rosną na kontakcie z roztworem glebowym z gleby zawierającej określone lub nieznanie zanieczyszczenia. W ramach testu wykorzystuje się zwykle nasiona roślin cechujących się szybkim wzrostem, tak aby można było dokonać pomiarów po 3 dniach. Są to np. sorgo (*Sorghum saccharatum*), pieprzycza siewna, zwana potocznie rzeżuchą (*Lepidium sativum*) oraz gorczyca biała (*Sinapis alba*). Do testu potrzebne są specjalne plastikowe płytki testowe, do których nakłada się próbkę gleby. Po dodaniu odpowiedniej ilości wody (albo roztworu zawierającego szkodliwą substancję o znanym stężeniu), na glebę nakłada się bibułę, na której w równych odległościach układa się kilka nasion danego gatunku. Po upływie kilku dni dokonuje się fotografie wyrosniętych korzeni, a następnie za pomocą programu do obróbki fotografii, mierzy się długość tych korzeni. Porównując wyniki do tego, jak wyrosły rośliny na glebie kontrolnej, nie zawierającej zanieczyszczenia, można ocenić wpływ danej substancji na wzrost roślin.

Rozpoczęto od przygotowania 8 próbek kontrolnych, po dwie dla każdej z badanych gleb, jedną z nasionami rzeżuchy (*Lepidium sativum*), a drugą z nasionami gorczycy białej (*Sinapis alba*). Do próbek tych dodano 24 ml wody. Po upływie trzech dni zdecydowano, że do badań będą wykorzystywane nasiona rzeżuchy i należy zwiększyć ilość wody do 35 ml licząc na szybszy wzrost.

Przygotowanie jednej próbki składa się z kilku etapów (rys. 6). Na początku odważono 100 g gleby i wysypano je do jednego z zagłębień płytki. Następnie rozprowadzono glebę równomiernie po całej powierzchni zagłębienia i wyrównano, w celu uzyskania warstwy o jednolitej grubości. Na tak przygotowaną glebę rozlano ostrożnie za pomocą zlewki 35 ml wody destylowanej (próbki kontrolne) lub 35 ml roztworu soli określonego metalu w odpowiednim stężeniu (tab. 5). Ciecz została rozprowadzona w taki sposób, aby nasączyła się cała powierzchnia gleby, nieco więcej rozlano w górnej części zagłębienia, w miejscu gdzie miały kiełkować nasiona. Na wilgotną glebę nałożono bibułę, a następnie wykonano na niej niewielkie, podłużne zagłębienie w odległości ok. 1 cm od krawędzi na środku płytki. W zagłębieniu ułożono 11 nasion, przerwa między poszczególnymi nasionami wynosiła 1 cm (rys. 6). Na koniec drugim elementem zestawu zamykano szczelnie płytkę z glebą i nasionami. Taki zestaw ustawiano w pozycji pionowej w pudełku i przechowywano w kartonowym pudełku w stałej temperaturze 23°C. Płytki z nasionami przechowywano przez 72 godziny w ciemności, aby imitować sytuację, że nasiono jest umieszczone głęboko w glebie bez dostępu promieni słonecznych. Miało to na celu upodobnienie laboratoryjnych warunków kiełkowania do tych panujących w glebie.

**Fot. 2.** Przykładowe pudełka z nasionami jeszcze przed umieszczeniem w ciemności**Pic. 2.** Sample seed boxes before being placed in the dark



Rys. 6. Prace laboratoryjne nad testem Phytotoxkit

Fig. 6. Laboratory work on the Phytotoxkit test

łącznie przygotowano 68 próbek, po 17 dla każdej z czterech gleb, w tym 2 próbki kontrolne i 15 próbek testowych, po trzy w różnych stężeniach dla każdego z pięciu metali. Próbki były przechowywane w ciemności, w temperaturze ok. 23°C przez 3 dni. Po upływie dokładnie 72 godzin wyjmowano je z pudełka i wykonywano fotografię. W celu pomiaru długości korzeni wykorzystano program do przetwarzania zdjęć ImageJ. Po zgraniu zdjęć na komputer, otwierano je w programie i dokonywano kalibracji. Następnie dokonywano pomiaru długości każdego korzenia we wszystkich 68 płytках. Dokonywano tego poprzez ręczne przeciągnięcie kursora myszki wzdłuż całej długości korzenia, od miejsca z którego wykiełkował z nasiona rzeżuchy do samego końca korzenia. Wyniki skrupulatnie odnotowywano i wykorzystano je do obliczenia średniej długości korzeni dla każdej płytki. Do obliczenia średniej wykorzystywano długości tylko ośmiu najdłuższych korzeni w każdej płytce. Miało to na celu wyeliminowanie wartości, które wprowadzałyby błąd do średniej. Mimo wstępnej selekcji i oglądania nasion, nie uniknęliśmy drobnych wad nasion, jak pęknięcia i nieco inny kształt. One wykiełkowały, ale wyrosły z nich zdecydowanie krótsze korzenie w porównaniu do pozostałych. W niektórych przypadkach jeden z korzeni przebijał się przez bibułę, wobec tego nie dało się go zmierzyć. Dlatego z 11 nasion mierzono zawsze tylko długości 8 najdłuższych korzeni. W ten sposób niwelowano przypadkowość w eksperymencie.

7. Wyniki badań

Uziarnienie gleb. Według podziału uziarnienia gleb z 1976 roku (Branżowa Norma 1976), każda z czterech gleb należy do innej podgrupy granulometrycznej (tab. 6). Gleba nr 1 to piasek luźny, gleba 2 – piasek gliniasty mocny, gleba 3 – piasek gliniasty lekki, z kolei gleba 4 to piasek słabogliniasty pylasty. Według podziału uziarnienia gleb z 2008 roku (PTG 2009), wszystkie gleby należą do jednej podgrupy granulometrycznej – piasków gliniastych (tab. 7). Różnice w klasyfikacji wynikają z innych przedziałów średnic ziaren, do których są dopasowywane poszczególne frakcje i podfrakcje granulometryczne oraz z innego podziału na grupy i podgrupy granulometryczne. W starszej klasyfikacji BN 1976 wyodrębnia się więcej podgrup w grupie piasków, natomiast mniej w grupie pyłów i ilów w porównaniu do podziału PTG 2009. Z tego powodu, starsza klasyfikacja nieco lepiej oddaje charakter granulacji poszczególnych gleb. Z drugiej strony różnice w uziarnieniu gleb 1, 2, 3 i 4 nie są duże i przy uziarnieniu wg PTG 2009 mieszczą się w jednej grupie granulometrycznej.

Wszystkie gleby są do siebie zbliżone pod względem składu granulometrycznego i można je określić jako piaszczyste lub jako gleby lekkie. Frakcja piasków jest wyraźnie dominująca w każdym przypadku, co jest zwłaszcza dobrze widoczne w glebie nr 1 z użytku zielonego. Gleby z gruntów ornych zawierają nieco więcej frakcji pylastej

i ilastej. Gleby lekkie charakteryzują się słabą odpornością na zanieczyszczenia metalami ciężkimi, ponieważ wykazują małą pojemność sorpcyjną. Mała sorpcja z jednej strony powoduje łatwiejsze wymywanie metali ciężkich, ale z drugiej strony skutkuje ona niedoborami składników pokarmowych. Poza tym gleby ciężkie skutecznie wiążą metale ciężkie w swoim kompleksie sorpcyjnym, przez

co rośliny pobierają ich więcej właśnie z gleb lekkich. Dodatkowo gleby lekkie wykazują zbyt dużą przepuszczalność, co skutkuje niedoborami wody w profilu glebowym (Tołoczko 2019).

Uziarnienie wszystkich analizowanych gleb można uznać jako niekorzystne z punktu widzenia odporności na zanieczyszczenie metalami ciężkimi.

Tabela 6. Skład granulometryczny badanych gleb (Branżowa Norma 1978)

Table 6. Granulometric composition of the tested soils (Branżowa Norma 1978)

Nr próbki	% podfrakcji granulometrycznych o ϕ w mm								% frakcji granulometrycznych o ϕ w mm			Grupa granulometryczna
	piasek gruby	piasek średni	piasek drobny	pył gruby	pył drobny	ił pyłowy gruby	ił pyłowy drobny	ił koloidalny	piaski	pyły	iły	
	1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	0,05–0,02	0,02–0,006	0,006–0,002	< 0,002	1,0–0,1	0,1–0,02	< 0,02	
1	9,8	41,8	23,4	9	12	2	1	1	75	21	4	piasek luźny (<i>pl</i>)
2	8,9	24,5	26,6	12	11	9	4	3	61	23	16	piasek gliniasty mocny (<i>pgm</i>)
3	5,5	16,3	33,2	19	14	9	1	2	55	33	12	piasek gliniasty lekki pylasty (<i>pglpy</i>)
4	8,5	26,3	26,2	15	14	7	1	2	61	29	10	piasek słabogliniasty pylasty (<i>psgpy</i>)

Tabela 7. Skład granulometryczny badanych gleb według podziału PTG z 2008 r. (PTG 2009)

Table 7. Granulometric composition of the tested soils according to the PTG division from 2008 (PTG 2009)

Nr próbki	% podfrakcji granulometrycznych o ϕ w mm								% frakcji granulometrycznych o ϕ w mm			Grupa granulometryczna
	piasek bardzo gruby	piasek gruby	piasek średni	piasek drobny	piasek bardzo drobny	pył gruby	pył drobny	frakcja iłowa	piaski	pyły	iły	
	2,0–1,0	1,0–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	0,05–0,02	0,02–0,002	< 0,002	2,0–0,05	0,05–0,002	< 0,002	
1	3,6	9,2	40,0	22,2	9	12	3	1	84	15	1	piasek gliniasty (<i>pg</i>)
2	2,1	8,6	23,6	25,7	12	11	13	3	73	24	3	piasek gliniasty (<i>pg</i>)
3	1,0	5,4	16,0	32,6	19	14	10	2	74	24	2	piasek gliniasty (<i>pg</i>)
4	2,8	8,1	25,1	25,0	15	14	8	2	76	22	2	piasek gliniasty (<i>pg</i>)

Odczyn gleb. Wyniki pomiarów odczynu metodą kolorymetryczną wskazały różnice między wartością pH gleby nr 1 z łąki a pH gleb z gruntów ornych. Zabarwienie wskaźnika Hellige'a dla gleby nr 1 było wyraźnie zielone, co wskazuje na pH powyżej 7, czyli odczyn obojętny lub zasadowy. Dla pozostałych gleb wskaźnik zabarwił się na różne odcienie żółtopomarańczowego, ponieważ pH wynosiło mniej niż 7, czyli ich odczyn był obojętny lub lekko kwaśny (fot. 3). Dokładniejsze wyniki otrzymano dzięki zastosowaniu metody potencjometrycznej, która potwierdziła wstępne wskazania na kwasomierzu Hellige'a. Na podstawie pomiaru ustalono że: gleba nr 1 posiada pH 7,3 na pograniczu odczynu obojętnego i zasadowego; gleba nr 2 posiada pH 5,7, więc jest lekko kwaśna; gleba nr 3 ma pH 6,7, co można uznać za odczyn obojętny; gleba nr 4 posiada pH 6,2, czyli odczyn lekko kwaśny (tab. 8).

Za najbardziej optymalne pH gleb dla wzrostu roślin uznaje się przedział 6,0–7,2, a więc odczyn obojętny, ewentualnie lekko kwaśny. Spośród badanych gleb to gleby 3 i 4 wpasowują się w ten zakres, więc należy uznać, że posiadają one korzystny odczyn. Gleba 1 jest lekko zasadowa, co prawdopodobnie jest skutkiem wapnowania, ale można uznać, że nie będzie to miało wyraźnego negatywnego wpływu na wyniki eksperymentu. Gleba nr 2 również odbiega od optymalnego zakresu pH, a pomiar wykazał, że to gleba o odczynie lekko kwaśnym.

Badając odporność gleb na zanieczyszczenie metalami ciężkimi, odczyn kwaśny jest bardziej niekorzystny od odczynu zasadowego, ponieważ ułatwia rozpuszczanie soli metali ciężkich, a przez to ich pobieranie przez rośliny. Dlatego należy uznać, że pod tym względem gleby 1, 3 i 4 posiadają optymalny odczyn, natomiast gleba 2 jest nieco zbyt kwaśna.

Tabela 8. Odczyn badanych gleb

Table 8. pH of the tested soils

Nr próbki	1	2	3	4
Odczyn oznaczony potencjometrycznie	7,3	5,7	6,7	6,2



Fot. 3. Wyniki wstępnego pomiaru odczynu metodą kolorymetryczną

Pic. 3. Results of the initial reaction measurement using the colorimetric method

Zawartość węgla organicznego. Gleba nr 1 zawierała 2,8% Corg, czyli 4,83% próchnicy glebowej; gleba nr 2 odpowiednio 0,78% Corg i 1,34% próchnicy glebowej; badanie gleb nr 3 i 4 wskazało, że są bardzo podobne i obydwie zawierały w swoich poziomach próchnicznych takie same ilości 1,08% Corg i 1,87% próchnicy glebowej.

Glebova materia organiczna jest jednym z najistotniejszych czynników, od których zależy prawidłowy wzrost roślin, wpływa ona bowiem korzystnie na szereg różnych właściwości fizykochemicznych gleby. Pod kątem odporności gleb na zanieczyszczenie metalami ciężkimi, należy wspomnieć przede wszystkim o tym, że zwiększa pojemność sorpcyjną i wiąże metale skuteczniej niż kolojdy mineralne.

Spośród badanych gleb najwięcej materii organicznej zawiera gleba nr 1, pochodząca z użytku zielonego. Pozostałe gleby są zdecydowanie uboższe w materię organiczną. Spośród analizowanych do tej pory parametrów, zachodzi tutaj największa różnica między glebą z łąki a glebami z gruntów uprawnych. Należy więc stwierdzić, że pod tym względem gleba nr 1 posiada korzystniejsze warunki dla rozwoju roślin niż gleby 2, 3 i 4.

Test Phytotoxkit. Średnia długość korzeni dla **gleby nr 1** w próbkach kontrolnych wyniosła 74 mm. Przy II stopniu zanieczyszczenia (rys. 7), żaden z metali nie zahamował w niej wzrostu rzeżuchy, korzenie były krótsze niż w próbce kontrolnej w minimalnym stopniu. Przy III stopniu zanieczyszczenia – ołów, kadm i miedź również nie wpłynęły negatywnie na kiełkowanie, a w przypadku miedzi korzenie były nawet nieco dłuższe niż w próbce kontrolnej, choć możliwe, że była to kwestia lepszych jakościowo nasion w tej próbce testowej. Uwidoczniała się natomiast na tym stopniu szkodliwa działalność niklu oraz cynku, które spowodowały kolejno 50% i 70% zahamowanie wzrostu. Przy IV stopniu już tylko kadm nie wpłynął negatywnie na rozwój rzeżuchy. Kationy miedzi zahamowały rozwój w ok. 35%, natomiast pozostałe metale ciężkie

w bardzo dużym stopniu ograniczyły wzrost korzeni. Oceniono to na 90% zahamowanie wzrostu. Warto zwrócić uwagę na ołów, bowiem w porównaniu z II i III stopniem zanieczyszczenia, zwiększenie dawki do IV stopnia spowodowało bardzo duży wzrost jego siły oddziaływania.

Dla **gleby nr 2** średnia długość korzeni w próbkach kontrolnych wyniosła 66 mm. Już przy II stopniu (rys. 8) widać wyraźne zahamowanie wzrostu w przypadku wszystkich metali. Oszacowano zahamowanie o ok. 35% dla kadmu i ołowiu, ale aż 85% dla cynku, miedzi i niklu. Na III stopniu ołów wykazuje już znacznie silniejsze oddziaływanie, cynk, miedź i nikiel ograniczają wzrost korzeni w podobnym do poprzedniego stopnia, natomiast w przypadku kadmu zaszła ciekawa sytuacja, ponieważ korzenie wyrosły dłuższe niż w próbce kontrolnej (średnia długość 71 mm). Na IV stopniu korzenie w próbce z kadmem wyrosły nawet jeszcze dłuższe. Pozostałe metale spowodowały oczekiwany skutek, tzn. bardzo mocne zahamowanie wzrostu, rzędu ponad 90%. W przypadku ołowiu nie wykiełkowało żadne nasionko i jest to jedyny taki przypadek we wszystkich analizowanych próbkach.

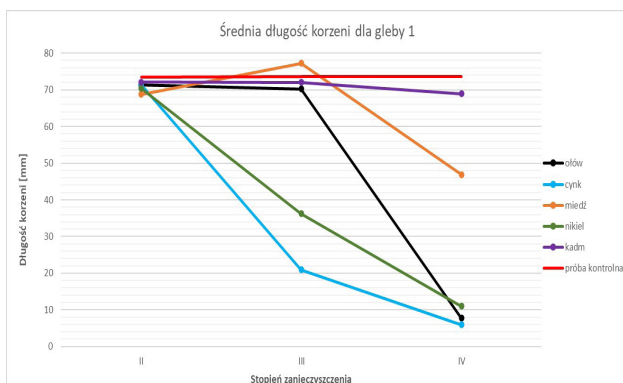
Średnia długość korzeni dla **gleby nr 3** w próbkach kontrolnych wyniosła 72 mm. Przy II stopniu zanieczyszczenia najmniej szkodliwymi metalami okazały się ponownie ołów i kadm, które tylko w ok. 15% zahamowały wzrost korzeni rzeżuchy (rys. 9). Pozostałe metale wykazały znacznie bardziej negatywne oddziaływanie, nastąpiło bowiem ok. 75% zahamowanie. Przy III stopniu zanieczyszczenia, cynk, miedź i nikiel pogorszyły jeszcze trochę rozwój roślin, jednak już dołączył do nich ołów. W przypadku kadmu, korzenie wyrosły nieco dłuższe, ale w przeciwieństwie do gleby 2, nie wyrosły one dłuższe niż w próbce kontrolnej. Przy IV stopniu w przypadku kadmu nastąpiło 25% zahamowanie wzrostu korzeni. Dla cynku, niklu i ołowiu nastąpiło pogłębienie negatywnego oddziaływania (ok. 95% zahamowanie), ale dla miedzi nastąpił niewielki wzrost korzeni.

Dla **gleby nr 4** średnia długość korzeni w próbkach kontrolnych wyniosła 71 mm. Wyniki w poszczególnych stopniach zanieczyszczenia są niemal identyczne (rys. 10), jak to miało miejsce w przypadku gleby nr 3. Różnice można zaobserwować w toksyczności ołowiu, który na III stopniu zanieczyszczenia wykazał jeszcze bardziej negatywne oddziaływanie na rozwój korzeni rzeżuchy oraz podobnie w przypadku cynku, miedzi i kadmu. Cynk na II stopniu zahamował wzrost w nieco mniejszym stopniu niż miedź, w trochę większym na II i IV stopniu. Z kolei negatywny wpływ kadmu przy IV stopniu zanieczyszczenia był nieco mniejszy niż na III stopniu zanieczyszczenia gleby.

W toku badań, najlepsze wyniki uzyskano dla **gleby nr 1**, pochodzącej z łąki, która miała największą zawartość węgla organicznego i najwyższy odczyn. Bardzo duże zahamowanie wzrostu osiągnięto tylko przy IV stopniu zanieczyszczenia i to w dodatku nie dla wszystkich metali. Wyniki dla gleb nr 2, 3 i 4 są dość do siebie zbliżone i wyraźnie słabsze niż dla gleby nr 1. W ich przypadku bardzo duże zahamowanie wzrostu zaobserwowano już przy II stopniu zanieczyszczenia dla cynku, miedzi i niklu. Cynk

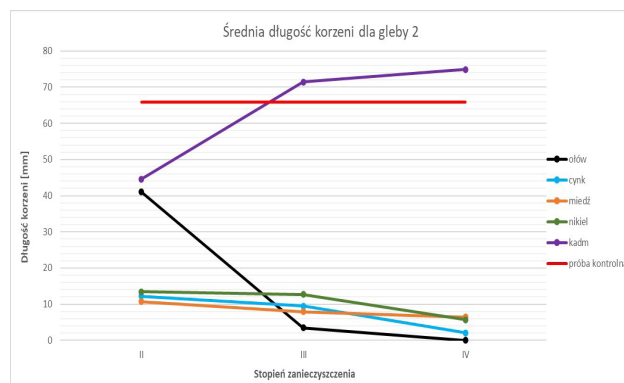
i nikiel są metalami, które najczęściej powodowały zahamowanie wzrostu większe niż 50%. Zwykle podobnie do nich oddziaływała na rośliny miedź, choć gleba nr 1 po jej skażeniu nie wykazała aż tak wysokiej toksyczności. Ołów na II stopniu zanieczyszczenia nie wykazywał znacząco negatywnego oddziaływania, natomiast gwałtownie rośnie ono przy zwiększaniu się dawki tego pierwiastka. Biorąc pod uwagę III i IV stopień zanieczyszczenia, ołów najczęściej powodował największe zahamowanie wzrostu. Kadm wykazał najmniejszą toksyczność dla roślin w ich począt-

kowej fazie rozwoju, a w przypadku gleby nr 2, korzenie w próbkach zanieczyszczonych tym metalem przy III i IV stopniu zanieczyszczenia osiągnęły zaskakująco duże rozmiary. Nieznany jest powód takiego stanu rzeczy, mało prawdopodobne jest bowiem, że to kwestia jakości nasion. W przypadku kadmu warto pamiętać, że jego dawka była znacznie mniejsza niż w przypadku pozostałych metali. Takie ilości nie oddziałują w znacząco negatywnym stopniu na wzrost roślin, ale trzeba wziąć tutaj pod uwagę jego wysoką toksyczność dla ludzi.



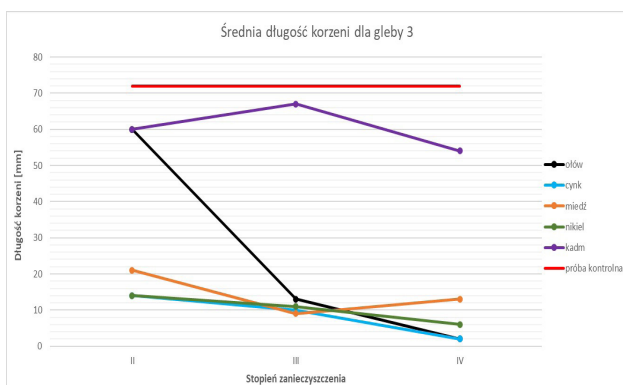
Rys. 7. Średnia długość korzeni rzeżuchy w eksperymencie z glebą nr 1 przy II, III i IV stopniu jej zanieczyszczenia

Fig. 7. Average length of cress roots in the experiment with soil no. 1 at levels II, III and IV of its contamination



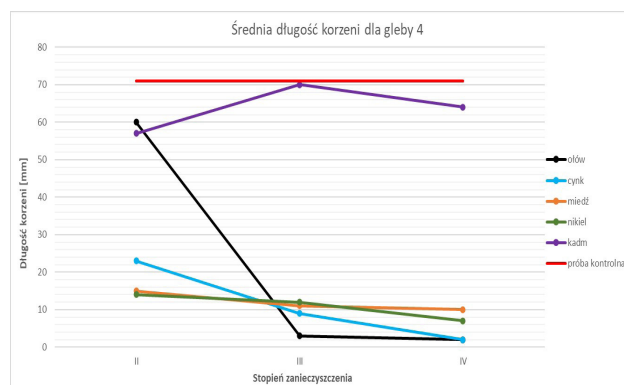
Rys. 8. Średnia długość korzeni rzeżuchy w eksperymencie z glebą nr 2 przy II, III i IV stopniu jej zanieczyszczenia

Fig. 8. Average length of cress roots in the experiment with soil no. 2 at levels II, III and IV of its contamination



Rys. 9. Średnia długość korzeni rzeżuchy w eksperymencie z glebą nr 3 przy II, III i IV stopniu jej zanieczyszczenia

Fig. 9. Average length of cress roots in the experiment with soil no. 3 at levels II, III and IV of its contamination



Rys. 10. Średnia długość korzeni rzeżuchy w eksperymencie z glebą nr 4 przy II, III i IV stopniu jej zanieczyszczenia

Fig. 10. Average length of cress roots in the experiment with soil no. 4 at levels II, III and IV of its contamination

8. Podsumowanie

Na podstawie wyników testu Phytotoxkit stwierdzono, że najbardziej odporną na zanieczyszczenie metalami ciężkimi glebą jest gleba nr 1, pochodząca z użytku zielonego. Poprzez najwyższą zawartość Corg i najwyższe pH, posiada ona lepsze warunki dla roślin w ich początkowej fazie rozwoju niż pozostałe trzy gleby z gruntów ornych. Biorąc pod uwagę trzy analizowane w badaniu właściwości gleb, czyli uziarnienie, odczyn i zawartość węgla organicznego wydaje się, że to wysoka zawartość materii organicznej

przemawia za tym, że gleba nr 1 wykazuje najwyższą odporność. W tym parametrze daje się zauważyć największą różnicę między glebą nr 1 a pozostałymi. Odczyn gleb mimo rozbieżności od lekko kwaśnego do zasadowego, nie wpływa na zróżnicowanie wyników otrzymanych w teście Phytotoxkit. Choć odczyn gleby nr 2 teoretycznie jest nieco zbyt kwaśny, to korzenie rzeżuchy osiągnęły podobną długość jak w przypadku gleby nr 3, charakteryzującej się obojętnym odczynem. Pod względem uziarnienia wszystkie gleby są do siebie zbliżone (gleby lekkie). Ten parametr należy uznać za niekorzystny z punktu widzenia

odporności na zanieczyszczenie metalami ciężkimi. Gleby z gruntów orných posiadają nieco większą zawartość frakcji pyłowej i ilowej, co teoretycznie powinno nieco poprawić ich odporność, ale nie ma to tak istotnego znaczenia jak zawartość materii organicznej.

Ustalono, że kompleks przydatności rolniczej i powiązana z nim klasa bonitacyjna, nie muszą wskazywać na odporność gleby. Rośliny rosnące na glebie nr 2 zaklasyfikowanej jako 2 kompleks pszennej dobrej i do klasy bonitacyjnej IIIb, w takim samym stopniu uległy zanieczyszczeniom jak rośliny z gleby nr 3, należącej do 9 kompleksu zbożowo-pastewnego słabego i do V klasy bonitacyjnej.

Wyniki badań wskazały wyraźnie na potrzebę dbania o parametry fizykochemiczne gleb wykorzystywanych rolniczo. Odczyn można poprawić, np. poprzez wapnowanie, z kolei zwiększenie zawartości materii organicznej można uzyskać dzięki stosowaniu nawozów organicznych lub przeorywaniu poplonów. Ważne jest również, aby pozostałości po uprawach pozostawały na polu. Takie zabiegi są szczególnie ważne dla gleb narażonych na zanieczyszczenie metalami ciężkimi, np. wzdłuż szlaków komunikacyjnych, jak droga ekspresowa S8.

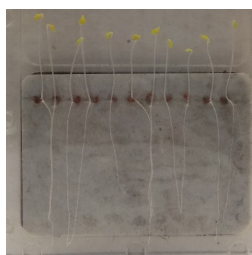
9. Literatura

- Becher, M., Tołoczko, W., Godlewska, A., Pakuła, K., Żukowski, E., 2022. Fractional Composition of Organic Matter and Properties of Humic Acids in the Soils of Drained Bogs of the Siedlce Heights in Eastern Poland. *Journal of Ecological Engineering* 23(3): 208–222.
- Bojakowska, I., Gliwicz, T., Sokołowska, G., Strzelecki, R., Wołkiewicz, S., 2000. Pierwiastki śladowe i promieniotwórcze w osadach zbiornika wrocławskiego. *Przegląd Geologiczny* 48: 831–836.
- Branżowa Norma, 1978. Gleby i utwory mineralne – Podział na frakcje i grupy granulometryczne. PKN, BN-78/9180-11, Warszawa.
- Czarnowska, K., Chlibiuk, M., Kozanecka, T., 2002. Pierwiastki śladowe w glebach uprawnych przy drogach wokół Warszawy. *Roczniki Gleboznawcze* 53(3/4): 67–74.
- Gałka, B., Wiatkowski, M., 2010a. Charakterystyka osadów dennych zbiornika zaporowego Młyny oraz możliwość rolniczego ich wykorzystania. *Woda–Środowisko–Obszary Wiejskie* 10, 4(32): 53–63.
- Gałka, B., Wiatkowski, M., 2010b. Metale ciężkie w wodzie i osadach dennych małego zbiornika wodnego Psurów. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych* 42: 225–232.
- Gawdzik, J., 2012. Mobilność wybranych metali ciężkich w osadach ściekowych na przykładzie wybranych oczyszczalni ścieków. *Inżynieria i Ochrona Środowiska* 15(1): 5–15.
- Gąsior, J., Kaniuczak, J., Hajduk, E., Właśniewski, S., Nazarkiewicz, M., Bilek, M., 2013. Metody badań fizycznych właściwości gleb. Wydawca: Katedra Gleboznawstwa, Chemii Środowiska i Hydrologii, Wydział Biologiczno-Rolniczy Uniwersytetu Rzeszowskiego, wspólnie z Wydawnictwem Uniwersytetu Pedagogicznego w Drohobyczu, Wydział Biologiczny, Ukraina, 54 s.
- Geoportal Województwa Łódzkiego, <https://www.mapy.lodzkie.pl>
- Gruca-Królikowska, S., Waclawek, W., 2006. Metale w środowisku. Cz. II. Wpływ metali ciężkich na rośliny. *Chemia, Dydaktyka, Ekologia, Meteorologia* 11(1–2): 41–56.
- IUNG 1999. Monitoring chemizmu gleb orných Polski. Program badań i wyniki wstępne. Inspekcja Ochrony Środowiska, Biblioteka Monitoringu Środowiska. Warszawa, 70 s.
- IUNG 2017. Raport z III etapu realizacji zamówienia „Monitoring chemizmu gleb orných w Polsce w latach 2015–2017”. Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa, Państwowy Instytut Badawczy w Puławach, pdf, 190 s. http://www.gios.gov.pl/chemizm_gleb/
- Jagodzińska, M., Rydzek, M., 2019. Wpływ metali ciężkich pochodzących ze środków transportu na środowisko. *Autobusy* 20(6): 69–70.
- Kabata-Pendias, A., Piotrowska, M., Motowicka-Terelak, T., Maliszewska-Kordybach, B., Filipiak, K., Krakowiak, A., Pietruch, C., 1995. Podstawy oceny chemicznego zanieczyszczenia gleb. Metale ciężkie, siarka i WWA. Biblioteka Monitoringu Środowiska. Warszawa, 41 s.
- Kabata-Pendias, A., Pendias, H., 2010. *Biochemia pierwiastków śladowych*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 382 s.
- Kabata-Pendias, A., Szteke, B., 2012. *Pierwiastki śladowe w geo- i biosferze*. IUNG–PIB, 270 s.
- Kalembasa, D., Becher, M., Pakuła, K., 2001. Gleby z poziomami żelazistymi w dolinie rzeki Liwiec. *Roczniki Gleboznawcze, Suplement* 52: 71–78.
- Kalembasa, D., Pakuła, K., Becher, M., Jaremko, D., 2008. Frakcje metali ciężkich w glebach położonych wzdłuż obwodnicy miasta Siedlce. *Roczniki Gleboznawcze* 59(2): 85–92.
- Karczewska, A., Bogda, A., Gałka, B., Kabała, C., Krysiak, A., Szopka, K., 2007. Metale ciężkie i arsen w glebach na obszarach dawnego górnictwa rud metali w Sudetach i na Przedgórzu Sudeckim WUG: Bezpieczeństwo pracy i ochrona środowiska w górnictwie, 4: 25–27.
- Kuziemska, B., Pakuła, K., Pieniak-Lendzion, K., Becher, M., 2017. Metale ciężkie w glebach położonych wzdłuż szlaków komunikacyjnych. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Przyrodniczo-Humanistycznego w Siedlcach, Seria Administracja i Zarządzanie* 39: 97–107.
- Laskowski, S., Tołoczko, W., 1995. Ocena stanu środowiska glebowego w otoczeniu aglomeracji miejsko-przemysłowej Zgierza. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 418: 313–320.
- Laskowski, S., Tołoczko, W., 1998. Zmiany odczynu i zawartości siarki w glebach objętych oddziaływaniem aglomeracji miejsko-przemysłowej Zgierza. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 456: 343–351.
- Laskowski, S., Tołoczko, W., 2001. Alterations of some chemical and physico-chemical properties of selected soils in field ecosystems. *Acta Agrophysica* 50: 177–188.
- Laskowski, S., Tołoczko, W., Rólka, M., 2001. Zawartość Pb, Zn, Cu w glebach przy drogach o różnym natężeniu ruchu w okolicach Łodzi. *Acta Agrophysica* 56: 137–144.
- Lazar, J., 1976. *Gleboznawstwo z podstawami geologii*. PWN, Warszawa–Poznań, 499 s.
- Mierzejewska, E., Tołoczko, W., Urbaniak, M., 2022. The effects of syringic acid on the properties of MCPA-contaminated soil and the growth of two cucurbit species. *International Journal of Phytoremediation* 24(2): 205–214.
- Nowak, M., Tołoczko, W., Trawczyńska, A., 2002. Produkcja preparatu wapniowo-magnezowego BIOCAL z osadów ściekowych w Aleksandrowie Łódzkim. *Acta Agrophysica* 73: 263–275.
- Ociepa-Kubička, A., Ociepa, E., 2012. Toksyczne oddziaływanie metali ciężkich na rośliny, zwierzęta i ludzi. *Inżynieria i Ochrona Środowiska* 15(2): 169–180.
- Pakuła, K., Jaremko, D., Becher, M., 2012. Zn, Cu i Ni we frakcjach wydzielanych metodą BCR w osadach dennych. *Proceedings of ECOpole* 6(2): 641–646. [https://doi.org/10.2429/proc.2012.6\(2\)086](https://doi.org/10.2429/proc.2012.6(2)086)
- PTG, 2009. Klasyfikacja uziarnienia gleb i utworów mineralnych – PTG 2008. *Roczniki Gleboznawcze – Soil Science Annual* 60(2): 5–16.
- Siebielec, G., Stuczyński, T., Terelak, H., Filipiak, K., Koza, P., Korzeniowska-Puculek, R., Łopatka, A., Jadczyzyn, J., 2008. Uwarunkowania produkcji rolniczej w regionach o dużym udziale gleb zanieczyszczonych metalami śladowymi. *Studia i Raporty IUNG – PIB* 12: 114–133.
- Siwek, M., 2008. Rośliny w skażonym metalami ciężkimi środowisku poprzemysłowym. Cz. II. Mechanizmy detoksyfikacji i strategię przystosowania roślin do wysokich stężeń metali ciężkich. *Wiadomości Botaniczne* 52(3–4): 7–23.
- Sumorok, B., Drobniwska, A., Kolasa, R., Zawadzka, A., Tołoczko, W., 2007. Wykorzystanie osadów pościekowych do nawożenia wierzby energetycznej. *Problemy Inżynierii Mechanicznej i Robotyki* 35: 293–299.

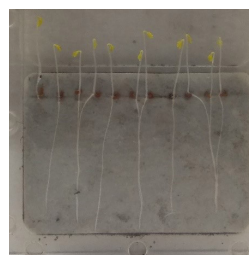
- Tołoczko, W., 2019. Ocena gleb piaszczystych o opadowo-retencyjnym typie zasilania wodą na podstawie badania eksperymentalnego dotyczącego podsiąku kapilarnego. *Acta Universitatis Lodzianensis. Folia Geographica Physica* 18: 67–75.
- Tołoczko, W., 2020. Gleby orne makro- i mezoregionów fizycznogeograficznych Polski. Wydawnictwo UŁ, 178 s.
- Tołoczko, W., Trawczyńska, A., Niewiadomski A., 2009. Content of organic compounds in soils fertilized with EM preparation. *Soil Science Annual* 60(1): 97–101.
- Trawczyńska, A., Tołoczko, W., 2005. Content of Cu, Pb, Zn and Cd in soils and ground water of the soils of Bzura River Valley, [w:] B. Gwozdek (red.), *Obieg pierwiastków w przyrodzie*, t. III: 169–173.
- Trawczyńska, A., Tołoczko, W., 2005. Content of heavy metals in ground water of the soil of Bzura river valley. *Chemia i Inżynieria Ekologiczna* 12(1–2): 121–126.
- Trawczyńska, A., Tołoczko, W., Niewiadomski, A., 2009. Zawartość pierwiastków śladowych w wodach górnej Bzury. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych* 40: 491–496.
- Urbaniak, M., Kiedrzyńska, E., Zieliński, M., Tołoczko, W., Zalewski, M., 2014a. Spatial distribution and reduction of PCDD/PCDF toxic equivalents along three shallow lowland reservoirs. *Environmental Science and Pollution Research* 21(6): 4441–4452.
- Urbaniak, M., Wyrwicka, A., Kiedrzyńska, E., Staniak, S., Gałązka, A., Tołoczko, W., Siebielec, G. 2014b. Problematyka przyrodniczego wykorzystania komunalnych osadów ściekowych. *Acta Innovations* 12: 35–48.
- Urbaniak, M., Wyrwicka, A., Tołoczko, W., Serwecińska, L., Zieliński, M., 2017. The effect of sewage sludge application on soil properties and willow (*Salix* sp.) cultivation. *Science of the Total Environment* 586: 66–75.
- WYTYCZNE IUNG do oceny stopnia zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi, s. 1–2. http://karnet.up.wroc.pl/~kabala/Wytyczne_IUNG.pdf

Załącznik 1

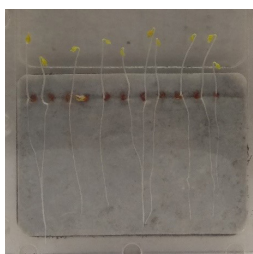
Zdjęcia korzeni kiełkującej rzeżuchy (fotografie własne)



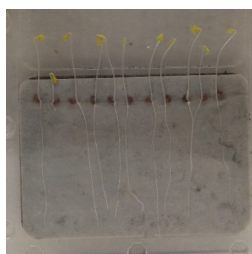
Gleba 1, próbka kontrolna 1



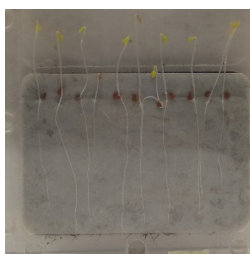
Gleba 1, próbka kontrolna 2



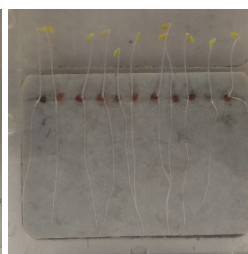
Gleba 1, Cd II



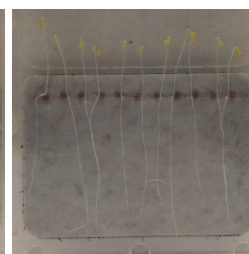
Gleba 1, Cu II



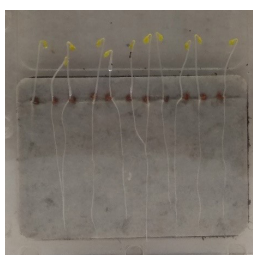
Gleba 1, Ni II



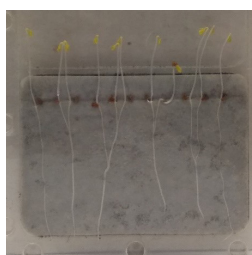
Gleba 1, Pb II



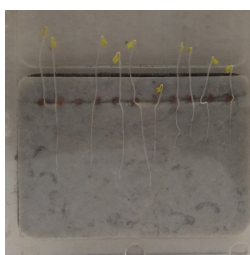
Gleba 1, Zn II



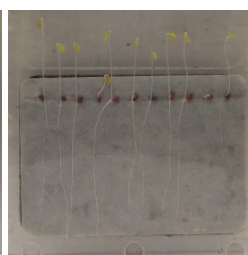
Gleba 1, Cd III



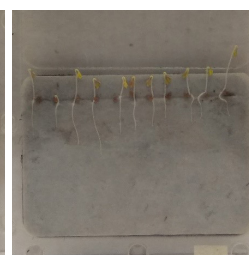
Gleba 1, Cu III



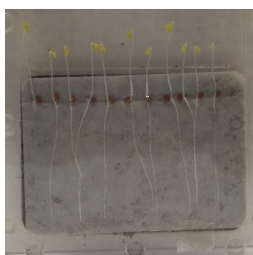
Gleba 1, Ni III



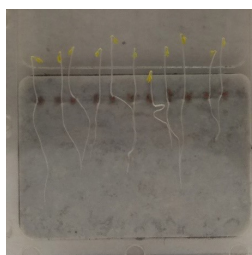
Gleba 1, Pb III



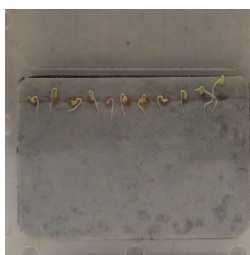
Gleba 1, Zn III



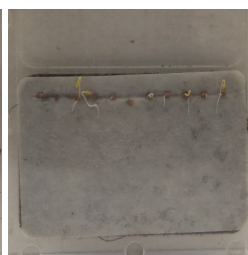
Gleba 1, Cd IV



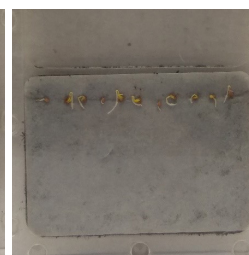
Gleba 1, Cu IV



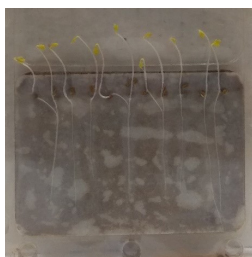
Gleba 1, Ni IV



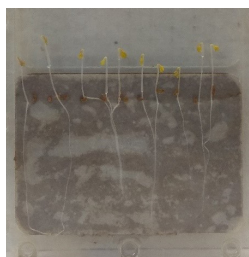
Gleba 1, Pb IV



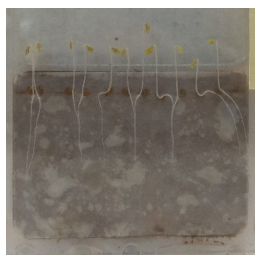
Gleba 1, Zn IV



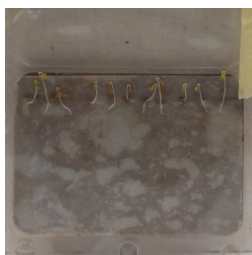
Gleba 2, próbka kontrolna 1



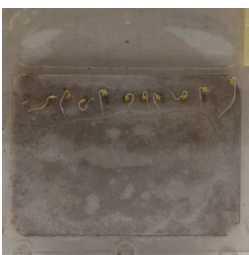
Gleba 2, próbka kontrolna 2



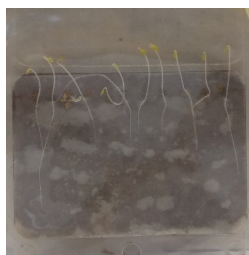
Gleba 2, Cd II



Gleba 2, Cu II



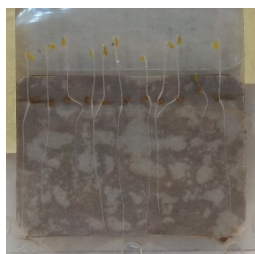
Gleba 2, Ni II



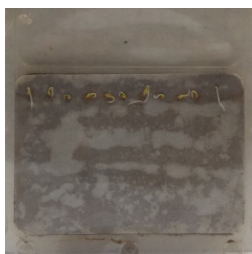
Gleba 2, Pb II



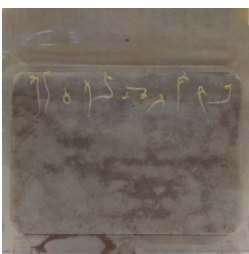
Gleba 2, Zn II



Gleba 2, Cd III



Gleba 2, Cu III



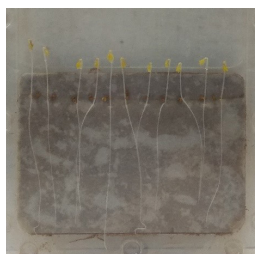
Gleba 2, Ni III



Gleba 2, Pb III



Gleba 2, Zn III



Gleba 2, Cd IV



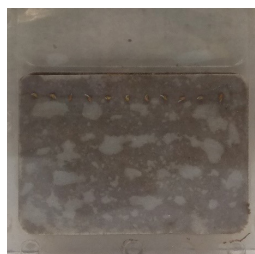
Gleba 2, Cu IV



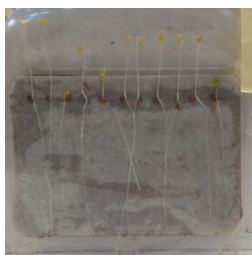
Gleba 2, Ni IV



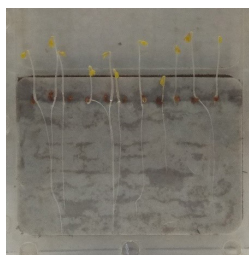
Gleba 2, Pb IV



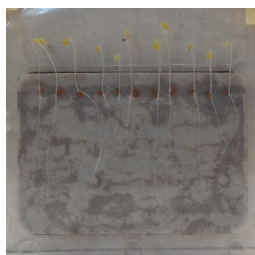
Gleba 2, Zn IV



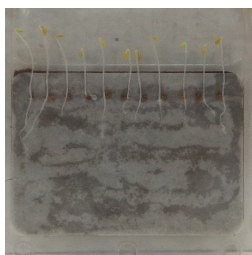
Gleba 3, próbka kontrolna 1



Gleba 3, próbka kontrolna 2



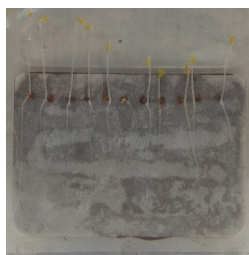
Gleba 3, Cd II



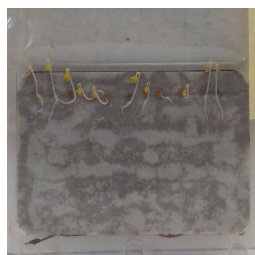
Gleba 3, Cu II



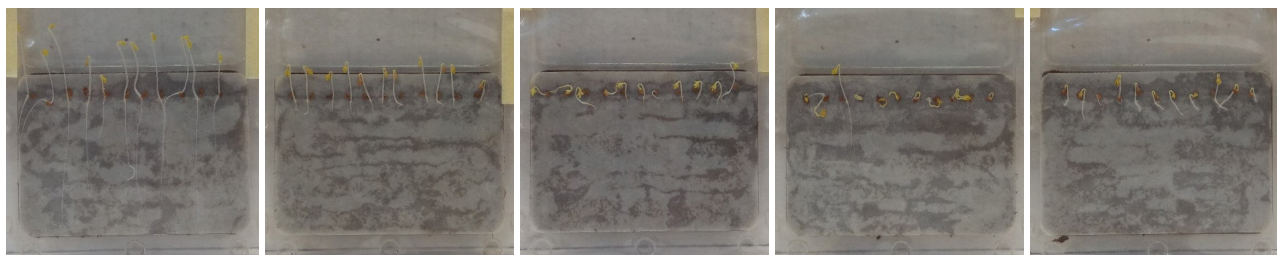
Gleba 3, Ni II



Gleba 3, Pb II



Gleba 3, Zn II



Gleba 3, Cd III

Gleba 3, Cu III

Gleba 3, Ni III

Gleba 3, Pb III

Gleba 3, Zn III



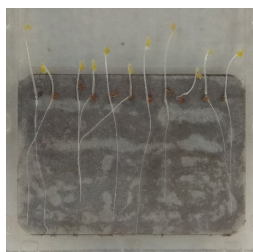
Gleba 3, Cd IV

Gleba 3, Cu IV

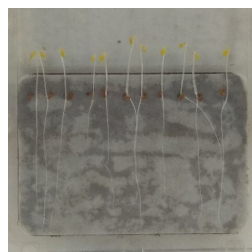
Gleba 3, Ni IV

Gleba 3, Pb IV

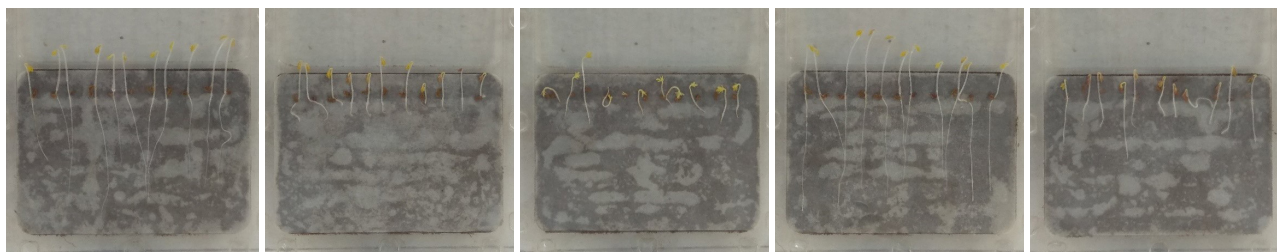
Gleba 3, Zn IV



Gleba 4, próbka kontrolna 1



Gleba 4, próbka kontrolna 2



Gleba 4, Cd II

Gleba 4, Cu II

Gleba 4, Ni II

Gleba 4, Pb II

Gleba 4, Zn II



Gleba 4, Cd III

Gleba 4, Cu III

Gleba 4, Ni III

Gleba 4, Pb III

Gleba 4, Zn III



Gleba 4, Cd IV

Gleba 4, Cu IV

Gleba 4, Ni IV

Gleba 4, Pb IV

Gleba 4, Zn IV