



Instytut Rolnictwa i Ogrodnictwa, Uniwersytet w Siedlcach,
ul. B. Prusa 14, 08-110 Siedlce, Polska

* e-mail: teresa.skrajna@uws.edu.pl

TERESA SKRAJNA ^{*}, MARIA ŁUGOWSKA 

Zawartość metali ciężkich w glebie oraz ich fitokumulacja w populacjach *Isopyrum thalictroides* L. na stanowiskach grądowych

Heavy metal content in the soil and their phytoremediation
by *Isopyrum thalictroides* L. populations in woodland habitats

Abstrakt. Badania prowadzono wczesną wiosną w latach 2021 i 2022 na czterech populacjach *Isopyrum thalictroides*. Pierwsza rosła w niezanieczyszczonym naturalnym kompleksie leśnym, pozostałe trzy w niewielkich śródpolnych wyspach leśnych. Celem badań była ocena zawartości metali ciężkich (Fe, Mn, Cd, Pb, Cr, Zn, Ni) w glebie oraz ich fitokumulacji w populacjach *Isopyrum thalictroides* występujących na siedliskach grądowych o zróżnicowanym natężeniu antropopresji rolniczego pochodzenia. Z każdego stanowiska pobrano próby roślinne i glebowe. Oznaczono zawartość metali ciężkich metodą emisyjnej spektrometrii optycznej (ICP-OES). Wyliczono wskaźnik kumulacji oraz dokonano analizy pomiarów indeksu zieloności liści SPAD. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że zawartość metali w roślinach i glebie była zróżnicowana i zależała od zajmowanego stanowiska. Najniższe stężenie notowano w próbach roślin pochodzących ze zwartego kompleksu leśnego, a istotnie wyższe w próbach roślin pobranych ze śródpolnych wysp. Podobnie zawartość metali w glebie była najniższa w próbie z kompleksu leśnego, a wyższa w próbach ze śródpolnych wysp leśnych. *Isopyrum thalictroides* w średnim stopniu kumuluje Fe, a w intensywnym stopniu Zn na wszystkich stanowiskach. Wykazuje intensywny stopień kumulacji Mn, Pb, Cr i Ni na stanowisku 2 (śródpolna wyspa), a średni na pozostałych stanowiskach. Natomiast indeks SPAD zazielenienia liści był najniższy dla zwartego kompleksu leśnego, a znacznie wyższy dla śródpolnych wysp, gdzie rośliny były lepiej odżywione azotem, co wskazuje na przenikanie związków N do gleb śródpolnych wysp. Przeprowadzone badania wskazują na rolnicze pochodzenie

Cytowanie: Skrajna T., Ługowska M., 2025. Zawartość metali ciężkich w glebie oraz ich fitokumulacja w populacjach *Isopyrum thalictroides* L. na stanowiskach grądowych. *Agron. Sci.* 80(2), 45–56. <https://doi.org/10.24326/as.2025.5513>

podwyższonych zawartości metali ciężkich w glebie śródpolnych wysp leśnych oraz możliwość wykorzystania *Isopyrum thalictroides* jako biowskaźnika do oceny stopnia skażenia metalami ciężkimi siedlisk grądowych.

Słowa kluczowe: metale ciężkie, fitokumulacja, siedliska grądowe, śródpolne wyspy

WSTĘP

Metale ciężkie są naturalnymi składnikami litosfery. Ich występowanie jest zróżnicowane przestrzennie. Jednak rosnące zanieczyszczenie tymi pierwiastkami jest od dekad jednym z głównych zagrożeń środowiska przyrodniczego [Anjum i in. 2015a, 2015b, 2016]. Procesy spalania paliw kopalnych w różnych sektorach przemysłowo-gospodarczych są głównym źródłem emisji metalami ciężkimi do środowiska przyrodniczego. Ważnym emitorem jest sektor rolniczy, w którym zanieczyszczenia z nawozów i środków ochrony roślin przenikają do gleb. Ich koncentracja w roztworze glebowym często prowadzi do ich nadmiernego pobierania przez rośliny, a tym samym do wnikania tych pierwiastków do łańcuchów pokarmowych [Krełowska-Kułas 2001].

W obszarach zurbanizowanych ocenę skażenia środowiska metalami ciężkimi dokonuje się na podstawie występowania naturalnych bioindykatorów, m.in. porostów, mchów, grzybów, chwastów czy roślin zielarskich [Polechońska i in. 2013, Galal i Shehata 2015, Nasr i Arp 2015]. Wynika to z tego, że rośliny charakteryzują się selektywnym pobieraniem mikropierwiastków ze środowiska i cechują się zróżnicowaną tendencją do pobierania określonych pierwiastków. Wysokim stopniem kumulacji w materiale roślinnym charakteryzuje się Cd, średnim – Zn, Mo, Cu, Co i Pb, słabym – Mn, Ni, Cr [Kabata-Pendias i Pendias 1999].

Specyficzna wrażliwość roślin na kumulowanie różnych pierwiastków i charakterystyczne zmiany morfologiczne, anatomiczne i fizjologiczne są wykorzystywane w biomonitoringu stężenia zanieczyszczeń w środowisku [Piecza i in. 2019]. Najczęściej w tym celu wykorzystuje się pospolite gatunki, takie jak: *Plantago major*, *Urtica dioica*, *Taraxacum officinale* [Balakhnina i in. 2016, Talukdar i Dutt 2018, Piecza i in. 2019]. Stanowią one również dobry fitoindykator zanieczyszczeń pochodzących ze źródeł antropogennych [Datcu i in. 2017, Huber i in. 2018]. W siedliskach naturalnych, w podszyciu lasów iglastych taką rolę pełnią *Vaccinium myrtillus* L. i *Vaccinium vitis-idaea* L. [Kandziora-Ciupa i in. 2017].

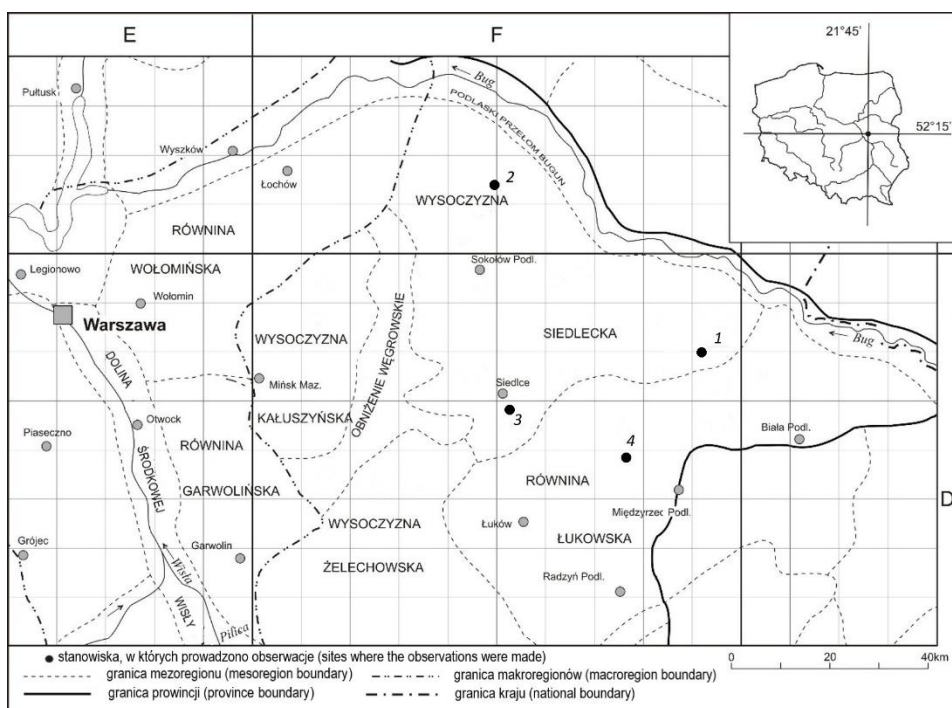
Isopyrum thalictroides jest gatunkiem wskaźnikowym tzw. starych lasów. Występuje w cienistych lasach liściastych typu grąd, jest gatunkiem charakterystycznym dla rzędu *Fagetalia sylvaticae* Pawł. in Pawł., Sokoł. Et Wall. 1928 [Matuszkiewicz 2001]. Europejska północna granica występowania *Isopyrum thalictroides* przebiega przez terytorium Polski. Gatunek występuje licznie na południu kraju na pogórzu i w pasie regla dolnego. Najdalej na zachód wysunięte stanowiska występują pojedynczo w okolicy Poznania. Większe skupiska tego gatunku można zaobserwować w południowej części Polski, na wschodzie i centralnej części kraju spotykana jest rzadziej. W zachodniej Polsce jest rzadkością [Jakubowska-Gabara 2011].

Celem badań była ocena zawartości metali ciężkich (Fe, Mn, Cd, Pb, Cr, Zn, Ni) w glebie oraz ich fitokumulacji w populacjach *Isopyrum thalictroides* występujących na siedliskach grądowych o zróżnicowanym natężeniu antropopresji rolniczego pochodzenia.

MATERIAŁ I METODY

Teren badań

Badania terenowe prowadzono wczesną wiosną w latach 2021 i 2022. Obiektami badań były populacje *Isopyrum thalictroides* położone w środkowej części województwa mazowieckiego na terenie czterech miejscowości (ryc. 1).



Ryc. 1. Teren badań [oprac. własne na podst. podziału fizjograficznego Polski wg J. Kondrackiego]
Fig. 1. Study area [own study based on the physiographic division of Poland according to J. Kondracki]

Numer stanowiska:

1) Dzięcioły – największa populacja o powierzchni ok. 80 m², obficie kwitnąca o strukturze łąkowej i kępowo-skupiskowej [Chassel 1977]. Występowała w zwartym kompleksie leśnym o powierzchni ok. 70 ha, współrzędne 22°45'02"E, 52°15'07"N, współrzędne ATPOL FD185621.

2) Kurowice – najmniejsza populacja, obejmująca zaledwie 4,5 m² powierzchni. Występowała w małych grupach i jako pojedyncze egzemplarze. Nielicznie egzemplarze wy-

stępują w fazie rozwoju generatywnego. Śródpolna wyspa leśna o charakterze grądu o powierzchni 1 ha, współrzędne geograficzne 22°19'8"E, 52°31'34"N, współrzędne ATPOLFC 856449.

3) Mościbrody – niewielka populacja zajmująca powierzchnię ok. 6 m², o strukturze grupowo-kępowej, dominowały okazy w fazie wegetatywnej, pojedyncze egzemplarze kwiaty i owocowały. Była mała śródpolna wyspa leśna o charakterze grądu o powierzchni 0,3 ha, współrzędne geograficzne 22°18'19"E, 52°06'13"N, współrzędne ATPOLFD 351676.

4) Krzesk – populacja *Isopyrum thalictroides* zajmowała ponad 8 m², była to struktura kępowa. Śródpolna wyspa leśna o charakterze grądu o powierzchni 0,7 ha, współrzędne geograficzne 22°36'49"E, 52°03'58"N, współrzędne ATPOLFD 376327.

Analizy laboratoryjne

Na każdej wyznaczonej powierzchni badawczej oznaczono odczyn gleby (pH w H₂O). Z warstwy gleby 0–10 cm pobrano losowo po 3 próby gleby, z których do badań przygotowano 500 g próbę zbiorczą. W materiale glebowym oznaczono ogólną zawartość pierwiastków: Cd, Pb, Zn, Cr, Cu, Ni, Fe, Mn po mokrym zmineralizowaniu próbek, przy użyciu wody królewskiej, za pomocą metody emisyjnej spektrometrii optycznej (ICP-OES) w Eurofins OBiKŚ Polska Sp. z o.o. w Katowicach.

Z każdej populacji w fazie kwitnienia losowo pobrano po 30 roślin (kłącze + część nadziemna), które zostały wysuszone, a następnie zmielone. W tak przygotowanym materiale roślinnym oznaczono zawartość metali ciężkich (Cd, Pb, Zn, Cr, Ni, Fe i Mn), metodą emisyjnej spektrometrii optycznej (ICP-OES) w laboratorium Eurofins OBiKŚ Polska Sp. z o.o. w Katowicach.

W każdej populacji *Isopyrum thalictroides* jednorazowo na 30 losowo wybranych okazach będących w fazie kwitnienia dokonano pomiaru indeksu zieloności liści za pomocą ręcznego miernika SPAD-502P firmy Minolta, który wskazuje na odżywienie roślin azotem [Wach 2015]. W tabeli 1 podano 10 wartości, każda z nich jest średnią wartością trzech pomiarów wykonanych na roślinach.

Tabela 1. Średnie pomiary zawartości chlorofilu na poszczególnych stanowiskach

Table 1. Mean chlorophyll content measurements at individual study sites

Liczba pomiarów Number of measurements	Stanowiska/Site			
	1	2	3	4
1	31,7	29,1	26,3	33,9
2	26,4	23,5	31,1	29,7
3	31,1	26,0	35,4	26,9
4	32	28,2	34,6	31,6
5	30,6	34,6	28,2	28,5
6	26,9	34,1	28,5	24,7
7	26,8	26,7	29,7	31,7
8	21,5	28,7	30,3	28,2
9	27,1	32,1	32,2	28,3
10	23,9	27,4	29,4	28,1
Średnia/Mean	27,8	29,04	30,57	29,16

Analizy statystyczne

Uzyskane wyniki badań opracowano statystycznie, wykorzystując analizę wariancji. O istotności wpływu czynników środowiskowych na wartość badanych cech wnioskowano na podstawie testu F Fishera-Snedecora, a istotność różnic między średnimi weryfikowano testem Tukeya przy $NIR_{0,05}$. W zestawieniach tabelarycznych materiału wynikowego posłużono się oznaczeniami literowymi grup jednorodnych. Liczby oznaczone tymi samymi literami w wierszach nie różnią się istotnie. Do obliczeń wykorzystano program statystyczny Statistica12.0 (Dell Inc., Tulsa, Oklahoma, USA).

Wyliczono współczynnik fitokumulacji (WF), wskazujący na możliwość pobierania przez roślinę metali ciężkich z gleby w odniesieniu do ilości ładunku migracyjnego [Stempin i in. 2002]. Współczynnik ten wykorzystuje się do oceny skażenia rośliny danym metalem w odniesieniu do sumy wielkości form biodostępnych danego pierwiastka w glebie.

Współczynnik fitokumulacji oblicza się według wzoru: $WF = C_1/C_2$; gdzie: C_1 – stężenie badanego metalu w roślinie, C_2 – stężenie badanego metalu w glebie. Interpretacja zakresu otrzymanych wartości: $WF \leq 0,01$ – kumulacja nie występuje, $WF \leq 0,1$ – słaby stopień kumulacji, $WF \leq 1,0$ – średni stopień kumulacji, $WF > 1,0$ – intensywny stopień kumulacji.

WYNIKI BADAŃ

Zawartość metali ciężkich w glebie

Próby gleby pobrane z poziomu 0–10 cm wykazały odczyn silnie kwaśny dla stanowiska 2 – pH 4,4 i kwaśny w przypadku pozostałych prób: stanowisko 1 – pH 4,9, stanowisko 4 – pH 4,8, stanowisko 3 – pH 5,4. Najwyższą zawartość Fe w glebie ($6610 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$), różniącą się istotnie od pozostałych prób, odnotowano w próbach ze stanowiska 4 (tab. 2). Natomiast zbliżoną zawartością charakteryzowały się próby ze stanowisk 2 ($3849 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$) i 3 ($4010 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$). Analiza wariancji wskazała także na najmniejszą zawartość żelaza oznaczoną w próbach gleby z lasu stanowisko 1 ($3690 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$), która istotnie różniła się od prób gleb pobranych ze stanowisk 3 i 4, ale była podobna do próby ze stanowiska 2 ($3849 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$) śródpolna wyspa. Średnia zawartość Mn w badanych próbach gleb wykazywała znaczne zróżnicowanie. Istotnie największa zawartość wystąpiła w próbie ze stanowiska 4 śródpolnej wyspy ($385 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$), a najmniejsza w glebie leśnej – stanowisko 1 ($165 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$). Natomiast podobne zawartości manganu miały próby ze stanowiska 2 ($200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$) i stanowiska 3 ($226 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$) – grupy jednorodne. W badanym materiale glebowym zawartość Cd była poniżej przyjętych wartości pomiarowych. Największe stężenie ołowiu, istotnie różniące się od pozostałych prób glebowych, oznaczono w próbie zbiorczej ze stanowiska 4 ($8,48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$). Podobnie kształtowała się zawartość Cr – ze stanowiska 4 była największa ($7,88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$), natomiast zbliżona w próbach ze stanowisk: 1 ($4,83 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$), 2 ($4,32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$) oraz 3 ($4,03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$). Zawartość Zn w glebie również była istotnie wyższa w próbie zbiorczej ze śródpolnej wyspy stanowisko 4 ($48,20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$), nieco mniejsza, ale różniąca się istotnie od pozostałych ze stanowiska 2 ($24,7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$). Natomiast najmniejsza zawartość cynku wystąpiła w glebach z 1 stanowiska – leśnego ($16,1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$) i stanowiska 3 – najmniejszej śródpolnej

wyspy ($18,9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$), były to istotnie niższe wyniki od pozostałych. Tak jak poprzednie pierwiastki Ni także osiągnął istotnie największą wartość w próbie ze stanowiska 4 ($4,51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$), pozostałe miejscowości charakteryzowały się zbliżonymi wartościami i nie odnotowano istotnych różnic pomiędzy nimi.

Tabela 2. Zawartość metali ciężkich w glebie ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m}$)
Table 2. Heavy metal content in soil ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ d.m}$)

Metal Metal	Stanowisko/Site				Średnia Mean
	1	2	3	4	
Fe	$3690 \pm 27,8^c$	$3849 \pm 41,1_{bc}$	$4010 \pm 39,9^b$	$6610 \pm 51,0^a$	4539,87
Mn	$165 \pm 7,02^c$	$200 \pm 9,91^b$	$226 \pm 6,03^b$	$385 \pm 4,81^a$	244,13
Cd	—	—	—	—	—
Pb	$4,68 \pm 0,71^b$	$6,10 \pm 0,31^a$	$5,70 \pm 0,81^b$	$8,48 \pm 0,42^b$	5,39
Cr	$4,83 \pm 1,01^b$	$4,32 \pm 0,51^b$	$4,03 \pm 0,61^b$	$7,88 \pm 0,44^a$	5,26
Zn	$16,1 \pm 1,91^c$	$24,7 \pm 1,81^b$	$18,9 \pm 1,72^c$	$48,20 \pm 2,88^a$	26,98
Ni	$2,92 \pm 0,45^b$	$2,02 \pm 0,60^b$	$2,02 \pm 0,31^b$	$4,51 \pm 0,71^a$	2,87
Suma/Total	$3883,5^b$	$4086,1^b$	$4266,6^b$	$7064,07^a$	—
Sucha masa (%) Dry matter (%)	$85,9 \pm 3,03^a$	$98,5 \pm 2,21^a$	$95,1 \pm 1,81^a$	$86,4 \pm 2,33^a$	91,47

Średnie w wierszach oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie, $\pm \text{SD}$ – odchylenie standardowe
Row means marked with the same letters do not differ significantly; $\pm \text{SD}$ – standard deviation

Łączną zawartość badanych metali w glebie istotnie wyższą od pozostałych prób odnotowano w próbach ze śródpolnej wyspy – stanowisko 4. Pod względem suchej masy wszystkie próby z badanych stanowisk osiągnęły podobne wartości.

Zawartości metali ciężkich w materiale roślinnym

Pod względem zawartości Fe (tab. 3) próby ze stanowisk śródpolnych wysp – stanowisko 2 ($2612 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$) i stanowisko 4 ($2441 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$) – wykazują istotnie wyższe zawartości tego pierwiastka od pozostałych prób. Natomiast leśna próba ze stanowiska 1 ($575 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$) i stanowiska 2 – śródpolna wyspa ($992 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$) – grupa jednorodna – charakteryzują się podobną, znacznie niższą zawartością żelaza w tkankach roślinnych. Są to stężenia znacznie wyższe niż podawane w literaturze [Kabata-Pendias i Pendias 1999].

Istotnie wyższą zawartość Mn oznaczono w próbach ze stanowiska 2 ($347 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$) oraz ze stanowiska 4 ($293 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$). Nieco mniejsze, nieróżniące się istotnie stężenia manganu oznaczono w próbie na stanowisku 3 ($992 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$), a najmniejszą w próbie leśnej – stanowisko 1 ($575 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$).

Zawartość Cd w materiale roślinnym z lasu stanowisko 1 i śródpolnej wyspy stanowisko 2 była znikoma (mniejsza od $0,050 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$). Nieco większą zawartość wskazała analiza prób z śródpolnych wysp stanowisko 4 – $0,482 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$, a największą $1,007 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$ ze stanowiska 3, przekraczające dopuszczalne stężenie $0,05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$ [Kwapuliński i in. 2005].

Tabela 3. Zawartość metali ciężkich w materiale roślinnym ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$)Table 3. Heavy metal content in plant material ($\text{mg kg}^{-1} \text{ d.m.}$)

Metal	Stanowisko/Site				Średnia Mean
	1	2	3	4	
Fe	$575 \pm 11,2^b$	$2612 \pm 10,7^a$	$992 \pm 8,82^b$	$2441 \pm 12,4^a$	1655,25
Mn	$90,2 \pm 3,89^c$	$347 \pm 4,02^a$	$164 \pm 5,22^b$	$293 \pm 7,83^a$	224,02
Cd	$<0,050$	$<0,050$	1,007	0,482	0,74
Pb	$2,47 \pm 0,83^c$	$8,26 \pm 0,89^a$	$3,53 \pm 1,10^c$	$6,34 \pm 0,99^b$	5,15
Cr	$1,15 \pm 0,73^c$	$4,62 \pm 0,57^a$	$1,39 \pm 0,41^c$	$3,44 \pm 0,63^b$	2,65
Zn	$47,3 \pm 2,13^b$	$107 \pm 4,09^a$	$108 \pm 4,80^a$	$106 \pm 6,88^a$	92,26
Ni	$1,59 \pm 0,63^b$	$2,92 \pm 0,53^a$	$1,06 \pm 0,43^b$	$2,32 \pm 0,44^a$	1,98
Suma /Total	717,99 ^c	3077,2 ^a	1271 ^b	2852,6 ^a	—
Sucha masa Dry Matter (%)	$93,1 \pm 1,93^a$	$94,4 \pm 1,74^a$	$94,3 \pm 1,41^a$	$95 \pm 1,13^a$	94,2

Średnie w wierszach oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie, $\pm\text{SD}$ – odchylenie standardowe
Row means marked with the same letters do not differ significantly; $\pm\text{SD}$ – standard deviation

Największe ilości Pb zostały oznaczone w materiale roślinnym w próbach ze śródpolnych wysp, ze stanowiska 2 ($8,26 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$) i stanowiska 4 ($6,34 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$), istotnie różniące się między sobą i pozostałymi próbami. Natomiast niskie stężenie Pb i brak istotnych różnic oznaczono między próbami ze stanowiska 3 – śródpolna wyspa ($3,53 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$) i stanowiska 1 – kompleks leśny ($2,47 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$). Otrzymane wartości wskazują na przekroczenie dopuszczalnego stężenia ołowiu w próbach pochodzących ze śródpolnych wysp, które dla surowców roślinnych wynosi $0,3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$ [Kwapuliński i in. 2005]. Podobny rozkład wartości zaobserwowano również w przypadku zawartości Cr, dla którego za naturalną zawartość w roślinach przyjmuje się $0,001 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$ [Kabata-Pendias i Pendias 1999].

Największe ilości Zn, nieróżniące się statystycznie, zaobserwowano w próbach ze śródpolnych wysp – stanowisko 2 ($107 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$), stanowisko 4 ($106 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$) i stanowisko 3 ($108 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$). Statystycznie najmniejszą jego zawartość, w odniesieniu do pozostałych prób, odczytano dla próby z kompleksu leśnego – stanowisko 1 ($47,3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$). Otrzymane wartości stężeń były wyższe od podawanych przez Kabatę-Pendias i Pendiasa [1999] dla roślin z terenów niezanieczyszczonych.

Istotnie wyższe stężenie Ni stwierdzono w materiale ze stanowiska 2 ($2,92 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$) i 4 ($2,32 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$), a znacznie niższe różniące się statystycznie dla stanowiska 1 ($1,59 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$) oraz stanowiska 3 ($1,06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$), nieprzekraczające naturalnej zawartości tego pierwiastka w roślinach ($0,1\text{--}5,0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$) [Kabata-Pendias i Pendias 1999].

Istotnie najwyższą łączną zawartość badanych metali odnotowano w próbach z wysp leśnych na stanowiskach 2 i 4, znacząco niższą ze stanowiska 3 oraz zdecydowanie najniższą zawartość miała próba z kompleksu leśnego – stanowisko 1.

Pod względem suchej masy wszystkie próby z badanych stanowisk osiągnęły podobne wartości.

Współczynnik fitokumulacji

Wartości współczynnika fitokumulacji WF (tab. 4) można było wyliczyć dla sześciu z siedmiu badanych pierwiastków. Na podstawie otrzymanych danych można stwierdzić, że *Isopyrum thalictroides* w średnim stopniu kumuluje Fe na wszystkich stanowiskach. Natomiast Mn, Pb, Cr i Ni wykazuje intensywny stopień kumulacji na stanowisku 2, a średni na pozostałych stanowiskach. Cynk w intensywnym stopniu jest kumulowany na wszystkich badanych stanowiskach.

Tabela 4. Wartości współczynnika fitokumulacji *Isopyrum thalictroides*
Table 4. Values of the phytoaccumulation factor for *Isopyrum thalictroides*

Metal	Stanowisko/Site				Średnia Mean
	1	2	3	4	
Fe	0,15	0,7	0,25	0,36	0,36
Mn	0,55	1,73	0,72	0,76	0,94
Cd	–	–	–	–	–
Pb	0,53	1,35	0,62	0,75	0,81
Cr	0,24	1,07	0,34	0,44	0,77
Zn	2,94	4,33	5,71	2,20	3,79
Ni	0,54	1,45	0,52	0,51	0,75
Średnia/Mean	0,82	1,77	1,36	0,84	–

Zawartości chlorofilu

Analiza pomiarów wskaźnika zieloności liści (tab. 1) wykazała najwyższą średnią wartość 30,57 w okazach populacji *Isopyrum thalictroides* rosnących na stanowisku 3 – najmniejsza śródpolna wyspa, gdzie największy wskaźnik SPAD wynosił 35,4, a najniższy 26,3. Nieco mniejszą średnią wynoszącą odpowiednio 29,16 i 29,04 oznaczono w populacjach występujących na stanowiskach 2 i 4. Na stanowisku 4 największy pomiar wynosił 33,9, a najniższy 24,7. Natomiast na stanowisku 2 najwyższą wartość chlorofilu oznaczono na poziomie 34,6 a najniższą 23,5. Pomiar wskaźnika zieloności liści był najniższy dla zwartego kompleksu leśnego – stanowisko 1 i wynosił 27,8 (wartość największa 31,7 oraz najniższa – 21,5).

DYSKUSJA

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że stężenie metali ciężkich w glebie na badanych stanowiskach nie przekraczało dopuszczalnych wartości (Cd – $2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$, Pb – $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$, Cr $150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$, Zn – $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$, Ni $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$) zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska [Dz.U. z 2016 r., poz. 1395]. Jednak wyższe lub istotnie wyższe były stężenia pierwiastków w próbach pochodzących ze śródpolnych wysp leśnych niż z kompleksu leśnego. Badania Głodowskiej i Gałązki [2018] wykazały, że substancje toksyczne, zwłaszcza metale ciężkie, czy pozostałości środków ochrony roślin mogą przedostawać się do roztworu glebowego i przenikać do sąsiadujących z polami środowisk. Takim zjawiskiem można tłumaczyć większą zawartość Fe, Mn, Pb i Zn w glebach śródpolnych wysp leśnych. Rolniczym źródłem zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi jest również wiele nawozów mineralnych, m.in. nawozy fosforowe, wapniowe czy osady ze ścieków komunalnych. Zachowanie zasad właściwej agrotechniki i nawożenia, ogranicza ryzyko kumulacji tych pierwiastków [Kabata-Pendias i Pendias 1993, Gorlach i Gambuś 1997]. Mobilność i biodostępność pierwiastków zależy od wielu czynników, takich jak: warunki glebowe, czynniki środowiskowe, rośliny, pierwiastki i inne [Ociepa i in. 2014]. Odczyn gleby decyduje o mobilności pierwiastków, jego wzrost ogranicza ruchliwość m.in. Pb, Ni i Cd [Siebielec i in. 2012]. W przeprowadzonych badaniach silnie kwaśny odczyn pH 4,4 gleby na stanowisku 2, śródpolnej wyspy wyraźnie zwiększył kumulację wszystkich badanych pierwiastków w roślinach w porównaniu z pozostałymi stanowiskami.

Zawartość metali w tkankach zdrojówki rutewkowatej była w dominującej części odzwierciedleniem zawartości tych pierwiastków w glebie. Wyższym stężeniem charakteryzowały się próby z wysp leśnych znajdujące się pod silniejszą antropopresją niż próba z czystego siedliska leśnego. Podobne zależności obserwowała Parzych [2014] u *Vaccinium myrtillus* w Słowińskim Parku Narodowym.

Z naszych badań wynika, że efektywność akumulacji metali przez *Isopyrum thalictroides* była zróżnicowana w zależności od pierwiastka i stanowiska. Na wszystkich stanowiskach współczynnik fitokumulacji dla cynku wynosił >1 (silna kumulacja) oraz <1 (średnia kumulacja) dla pozostałych pierwiastków. Uzyskane wyniki wskazują na tendencję zdrojówki do akumulacji badanych pierwiastków i możliwość wykorzystania jej jako bio wskaźnika zanieczyszczeń w siedliskach grądowych. Badanie nad wykorzystaniem roślin dna lasów jako bio wskaźników stanu środowiska prowadziło wielu badaczy, m.in. Reimann i in. [2001], Parzych [2014], Stefanowicz i in. [2016].

Pomiary indeksu zieloności liści pozwalają na określenie poziomu stresu w środowisku np. niedoboru wody, zawartości soli czy większą dostępność substancji odżywczych [Cetner i in. 2016, Wahono i in. 2021]. Podobnie Bărăscu i in. [2016] stwierdzili dodatnią istotną korelację między masą roślin nadziemnych, a wartością indeksu SPAD. Również zastosowanie preparatu Tytanit stymulowało biosyntezę chlorofilu w liściach i nieznacznie wpłynęło na wskaźnik zieloności liści (SPAD) [Wadas i Kalinowski 2017]. Prawdopodobnie migracja biogenów z pól, a zwłaszcza związków azotu, wpłynęła na wyższe wartości pomiarów SPAD dla roślin pobranych z populacji rosnących w wyspach śródpolnych.

PODSUMOWANIE

1. Znacznie wyższą zawartość metali ciężkich stwierdzono w próbach gleb pochodzących ze śródpolnych wysp leśnych niż ze zwartego kompleksu leśnego.

2. Największą zawartość metali ciężkich w roślinach określono w próbach pochodzących ze stanowisk śródpolnych wysp. Natomiast istotnie niższą zawartość oznaczono w roślinach z kompleksu leśnego – stanowisko 1.

3. *Isopyrum thalictroides* wykazuje średni stopień kumulacji Fe, intensywny Zn na wszystkich stanowiskach, wykazuje intensywny stopień kumulacji Mn, Pb, Cr i Ni w środowisku glebowym silnie kwaśnym, a w kwaśnym – średni.

4. Średnia zawartość chlorofilu w liściach zdrojówki rutewkowatej była największa w najmniejszej śródpolnej wyspie – stanowisko 3 – 30,57, najbardziej narażonej na przenikanie biogenów z pól. Natomiast najniższy średni pomiar zawartości chlorofilu uzyskano dla roślin będących w zwartym kompleksie leśnym, który był mniej narażony na zanieczyszczenia antropogeniczne.

PIŚMIENNICTWO

- Anjum S.A., Tanveer M., Hussain S., Bao M., Wang L.C., Khan I., Ullah E., Tung S.A., Samad R.A., Shahzad B., 2015a. Cadmium toxicity in Maize (*Zea mays* L.): consequences on antioxidative systems, reactive oxygen species and cadmium accumulation. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 22(21), 17022–17030. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4882-z>
- Anjum S.A., Tanveer M., Hussain S., Ehsanullah Wang L.C., Khan I., Samad R.A., Tung S.A., Anam M., Shahzad B., 2015b. Morphophysiological growth and yield responses of two contrasting maize cultivars to cadmium exposure. *Clean Soil Air Water* 44(1), 29–36.
- Anjum S.A., Tanveer M., Hussain S., Shahzad B., Ashraf U., Fahad S., Hassan W., Jan S., Khan I., Saleem M.F., Bajwa A.A., Wang L., Mahmood A., Samad R.A., Tung S.A., 2016. Osmoregulation and antioxidant production in maize under combined cadmium and arsenic stress. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 23(12), 11864–11875. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6382-1>
- Balakhnina T.I., Borkowska A., Nosalewicz M., Nosalewicz A., Włodarczyk T.M., Kosobryukhov A.A., Fomina I.R., 2016. Effect of temperature on oxidative stress induced by lead in the leaves of *Plantago major* L. *Inter. Agrophys.* 30, 285–292. <https://doi.org/10.1515/intag-2015-0094>.
- Bărașcu N., Duda M.M., Olteanu G., 2016. Study of dynamics SPAD and NDVI values of potato plants according to the differentiated fertilization. *Bull. UASVM, Agriculture* 73(1), 5–14. <https://doi.org/10.15835/buasvmcn-agr:12003>.
- Cetner M., Dąbrowski P., Samborska I., Łukasik I., Swoczyna T., Pietkiewicz S., Kalaji H., 2016. Zastosowanie pomiarów fluorescencji chlorofilu w badaniach środowiskowych. *Kosmos* 65(2), 197–205.
- Chassel D., 1977. La description nom paramétrique de la dispersionspatiale des individus d'une espece. *J. Franc. Biom.*, 28 april, 68.
- Datcu A.D., Sala F., Ianovici N., 2017. Studies regarding some morphometric and biomass allocation parameters in the urban habitat on *Plantago major*. *Res. J. Agric. Sci.* 49(4), 96–102. https://rjas.ro/paper_detail/2486
- Galal T.M., Shehata H.S., 2015. Bioaccumulation and translocation of heavy metals by *Plantago major* L. grown in contaminated soils under the effect of traffic pollution. *Ecol. Indic.* 48, 244–251. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.08.013>

- Głodowska M., Gałązka A., 2018. Intensyfikacja rolnictwa a środowisko naturalne. Zesz. Prob. Post. Nauk Rol. 592, 3–13. <https://doi.org/10.22630/ZPPNR.2018.592.1>
- Gorlach E., Gambuś F., 1997. Nawozy fosforowe i wieloskładnikowe jako źródło zanieczyszczenia gleby metalami ciężkimi. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. 448, 139–146.
- Huber M.A., Menshakova M.Y., Chmiel S., Zhigunova G.V., Dębicki R., Iakovleva O.A., 2018. Heavy metal composition in the *Plantago major* L. from center of the Murmansk City, Kola Peninsula, Russia. Eur. J. Biol. Res. 8(4), 214–223. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1461064>
- Jakubowska-Gabara J., 2011. Nowe stanowiska rzadkich, chronionych i zagrożonych gatunków roślin naczyniowych w Polsce środkowej. Wyd. Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Kabata-Pendias A., Pendias H., 1993. Biogeochemia pierwiastków śladowych. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- Kabata-Pendias A., Pendias H., 1999. Biogeochemia pierwiastków śladowych, wyd. 2 zm. PWN, Warszawa
- Kandziora-Ciupa M., Nadgórska-Socha A., Barczyk G., Ciepał R., 2017. Bioaccumulation of heavy metals and ecophysiological responses to heavy metal stress in selected populations of *Vaccinium myrtillus* L. and *Vaccinium vitis-idaea* L. Ecotoxicology 26, 966–980. <https://doi.org/10.1007/s10646-017-1825-0>
- Kondracki J., 2002. Geografia regionalna Polski. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- Krełowska-Kułas M., 2001. Chemiczne zanieczyszczenia żywności. Zesz. Nauk. Akad. Ekon. Krak. 572.
- Kwapuliński J., Michalewska A., Rochel R., Kowol J., 2005. Intoksykacja surowców roślin leczniczych metalami ciężkimi w świetle obowiązujących uregulowań ustawodawczych oraz zaleceń WHO. Probl. Ekol. 9(4), 202–204.
- Matuszkiewicz W., 2001. Przewodnik do oznaczania zbiorowisk roślinnych Polski. Vademecum Geobotanikum, PWN, Warszawa.
- Nasr M., Arp P.A., 2015. Biomonitoring and assessing total mercury concentrations and pools in forested areas. Biomonitoring 2, 47–63. <https://doi.org/10.1515/bimo-2015-0008>
- Ociepa E., Pachura P., Ociepa-Kubicka A., 2014. Wpływ niekonwencjonalnego nawożenia na migrację metali ciężkich w układzie gleba-roślina. Inż. Ochr. Środ. 17(2), 325–338.
- Parzych A., 2014. Zawartość wybranych metali ciężkich w glebie i pędach *Vaccinium myrtillus* L. w Słowińskim Parku Narodowym. Leśne Pr. Bad. 75(3), 217–224. <https://doi.org/10.2478/frp-2014-0020>
- Pieczka M., Świsłowski P., Rajfur M., 2019. Zanieczyszczenie metalami ciężkimi *Matricaria chamomilla* L. i *Plantago lanceolata* L. Proc. ECOpole 13(1), 135–145. [https://doi.org/10.2429/proc.2019.13\(1\)014](https://doi.org/10.2429/proc.2019.13(1)014)
- Polechońska M., Zawadzki K., Samecka-Cymerman A., Kolon K., Klink A., Krawczyk J., Kempers A.J., 2013. Evaluation of the bioindicator suitability of *Polygonum aviculare* in urban areas. Ecol. Indic. 24, 552–556. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.08.012>
- Reimann C., Koller F., Kashulina G., Niskavaara H., Englmaier P., 2001. Influence of extreme pollution on the inorganic chemical composition of some plants. Environ. Poll. 115, 239–252.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 19 lipca 2016 r. w sprawie sposobu prowadzenia oceny zanieczyszczenia powierzchni ziemi [Dz.U. z 2016 r., poz. 1395].
- Siebielec G., Smreczak B., Klimkowicz-Pawlas A., Maliszewska-Kordybach B., Terelak H., Koza P., Hryńczuk B., Łysiak M., Miturski T., Gałązka R., Suszek B., 2012. Monitoring chemizmu gleb ornych w Polsce w latach 2010–2012. IUNG Puławy, s. 105–179.
- Stefanowicz A.M., Stanek M., Woch M.W., 2016. High concentrations of heavy metals in beech forest understory plants growing on waste heaps left by Zn-Pb ore mining. J. Geochem. Explor. 169, 157–162.
- Stempin M., Kwapuliński J., Brodziak B., Trzcionka J., Ahnert B., 2002. Ocena kontaminacji roślin metalami na terenach miedzionośnych. Bromat. Chem. Toksykol. 35(3), 275–282.

- Talukdar P., Dutt A., 2018. Biomonitoring with special reference to leaf and pollen morphology in *Cassia sophora* L. to detect roadside air pollution. World Sci News. 105, 168–181. <http://psjd.icm.edu.pl/psjd/element/bwmeta1.element.psjd-e5e9d3e4-3414-4ba7-8247-03c2fe098381?printView=true>
- Wach D., 2015. Metody oceny stanu odżywienia roślin. St. Rap. IUNG-PIB, 42(16), 53–68. <https://doi.org/10.26114/sir.iung.2015.42.2>
- Wadas W., Kalinowski K., 2017. Effect of titanium on assimilation leaf area and chlorophyll content of very early maturing potato cultivars. Acta Sci. Pol. Agric. A 16(2), 87–98.
- Wahono L., Didik I., Bambang H.S., Eko H., Djoko P., 2021. Comparing visible light based vegetation index and chlorophyll meter to estimate chlorophyll and nitrogen content of tea (*Camellia sinensis* L. Kuntze). An. R.S.C.B. 25(1), 5033–5043.

Źródło finansowania: Badania przeprowadzone w ramach zadania badawczego nr 38/20/B finansowane z dotacji na naukę przyznanej przez Ministerstwo Edukacji i Nauki.

Abstract. The research was conducted in early spring in 2021 and 2022 on four populations of *Isopyrum thalictroides*. The first one grew in an unpolluted natural forest complex, the other three in small mid-field forest islands. The aim of the research was to assess the content of heavy metals (Fe, Mn, Cd, Pb, Cr, Zn, Ni) in the soil and their phytoaccumulation in *Isopyrum thalictroides* populations occurring in oak-hornbeam habitats with varying intensity of agricultural anthropopression. Plant and soil samples were taken from each site. The content of heavy metals was determined using the optical emission spectrometry method (ICP-OES). The accumulation index was calculated and the SPAD leaf greenness index measurements were analyzed. Based on the research, it can be concluded that the content of metals in plants and soil was varied and depended on the site occupied. The lowest concentration was recorded in plant samples from the compact forest complex, and significantly higher in plant samples taken from the mid-field islands. Similarly, the content of metals in the soil was the lowest in the sample from the forest complex, and higher in samples from the mid-field forest islands. *Isopyrum thalictroides* accumulates Fe to a moderate degree, and Zn to an intensive degree at all sites. In relation to Mn, Pb, Cr and Ni, it shows an intensive degree of accumulation at site 2 (mid-field island), and average at the remaining sites. On the other hand, the SPAD leaf greenness index was the lowest for the compact forest complex, and significantly higher for the mid-field islands, i.e. better plant nutrition with nitrogen, which indicates the penetration of N compounds into the soils of the mid-field islands. The conducted studies indicate the agricultural origin of increased heavy metal contents in the soil of mid-field forest islands and the possibility of using *Isopyrum thalictroides* as a bioindicator to assess the degree of heavy metal contamination of oak-hornbeam habitats.

Keywords: heavy metals, phytoaccumulation, oak-hornbeam habitats, mid-field islands

Otrzymano/Received: 26.03.2025

Zaakceptowano/Accepted: 24.06.2025

Opublikowano/Published: 08.09.2025