



**UNIwersytet  
PRZYRODNICZY  
WE WROCLAWIU**

**WYDZIAŁ PRZYRODNICZO-TECHNOLOGICZNY**

**mgr inż. Agnieszka Woś**

**Porównawcza analiza ekologiczna wybranych gatunków  
zbiorowisk ciepłolubnych muraw występujących na różnych  
podłożach geologicznych**

Comparative ecological analysis of selected species from dry grasslands growing  
on various geological substrates

**Praca doktorska**

**wykonana pod kierunkiem**

**Promotora: dr. hab. inż. Ludwika Żołnierza, prof. uczelni**

**Katedra Botaniki i Ekologii Roślin**

**Promotora pomocniczego: dr. hab. inż. Daniela Pruchniewicza,**

**prof. uczelni**

**Katedra Botaniki i Ekologii Roślin**

Wrocław 2021



## Spis treści

1. Wstęp.....	5
2. Cel i zakres pracy .....	11
3. Charakterystyka obszaru badań.....	12
3.1 Lokalizacja badanych obiektów .....	12
3.2 Geologia i rzeźba obszaru badań .....	16
3.2.1 Przedgórze Sudeckie – Masyw Ślęży, Wzgórza Niemczańsko-Strzelińskie.....	16
3.2.2 Sudety Zachodnie – Góry Kaczawskie .....	18
3.2.3 Wyżyna Śląska – Chełm .....	18
3.3 Klimat .....	19
3.3.1 Przedgórze Sudeckie – Masyw Ślęży, Wzgórza Niemczańsko-Strzelińskie.....	19
3.3.2 Sudety Zachodnie – Góry Kaczawskie .....	19
3.3.3 Wyżyna Śląska – Chełm .....	20
3.4 Roślinność.....	20
3.4.1 Przedgórze Sudeckie – Masyw Ślęży, Wzgórza Niemczańsko-Strzelińskie.....	20
3.4.2 Sudety Zachodnie – Góry Kaczawskie .....	21
3.4.3 Wyżyna Śląska – Chełm .....	22
4. Materiał i metody .....	24
4.1 Prace terenowe.....	24
4.1.1 Badania wpływu właściwości siedlisk na kompozycję i różnorodność gatunkową roślinności ciepłolubnych muraw .....	24
4.1.2 Badania zależności pomiędzy składem mineralnym gleb i roślin z ciepłolubnych muraw .....	25
4.2 Badania doświadczalne.....	27
4.2.1 Badanie zależności między zawartością niklu oraz stosunkiem Mg/Ca w pożywce a wzrostem i pobieraniem składników mineralnych przez rośliny z różnych podłoży geologicznych .....	27
4.2.2 Badanie reakcji roślin pochodzących z różnych podłoży geologicznych na czynniki kompleksu serpentynitowego .....	29
4.3 Prace laboratoryjne .....	31
4.3.1 Badania roślin .....	31
4.3.1.1 Oznaczenia gatunków problematycznych.....	31
4.3.1.2 Przygotowanie materiału roślinnego do analiz chemicznych.....	31
4.3.2 Przygotowanie gleb do analiz .....	31
4.3.3 Pomiary i oznaczenia .....	32
4.4 Analiza danych .....	33
4.4.1 Obliczenia wskaźników użytych w analizie danych.....	33
4.4.2 Analizy statystyczne .....	34
5. Wyniki .....	36
5.1 Opis właściwości siedlisk badanych zbiorowisk trawiastych .....	36
5.1.1 Analizy parametrów topograficznych oraz fizykochemicznych siedlisk .....	36
5.1.2 Analizy wielozmienne parametrów siedliskowych .....	47
5.2 Opis roślinności badanych zbiorowisk murawowych .....	53

5.2.1	Ogólna charakterystyka roślinności.....	53
5.2.2	Analizy ordynacyjne składu gatunkowego muraw.....	56
5.2.3	Charakterystyka reakcji gatunków na właściwości gleb.....	68
5.2.3.1	Wpływ właściwości siedlisk na pobieranie makro- i mikroelementów oraz metali ciężkich.....	68
5.2.3.2	Współczynniki koncentracji metali.....	72
5.2.3.3	Analizy wielozmienne składu chemicznego wybranych gatunków.....	74
5.3	Badania doświadczalne.....	84
5.3.1	Wzrost i pobieranie składników mineralnych przez rośliny uprawiane w kulturach wodnych przy różnych stężeniach niklu oraz stosunku Mg/Ca.....	84
5.3.1.1	Wzrost i skład pierwiastkowy wilczomlecza sosnki <i>Euphorbia cyparissias</i> .....	85
5.3.1.2	Wzrost i skład pierwiastkowy przytulii właściwej <i>Galium verum</i> .....	91
5.3.2	Wzrost i pobieranie składników mineralnych przez rośliny uprawiane na glebach serpentynitowej i granitowej.....	96
5.3.2.1	Wzrost i skład pierwiastkowy <i>Euphorbia cyparissias</i> .....	96
5.3.2.2	Wzrost i skład pierwiastkowy <i>Galium verum</i> .....	100
6.	Dyskusja.....	105
6.1	Właściwości siedlisk.....	105
6.2	Roślinność badanych muraw.....	110
6.2.1	Wpływ czynników siedliskowych na kompozycję gatunkową ciepłolubnych muraw.....	110
6.2.2	Wpływ czynników siedliskowych na bogactwo gatunkowe i produkcję biomasy ciepłolubnych muraw.....	111
6.2.3	Wpływ właściwości siedlisk na pobieranie makro- i mikroelementów oraz toksycznych metali ciężkich przez wybrane gatunki ciepłolubnych muraw.....	113
6.3	Badania doświadczalne.....	119
6.3.1	Wzrost i pobieranie składników mineralnych przez rośliny uprawiane w kulturach wodnych przy różnych stężeniach niklu oraz stosunku Mg/Ca.....	119
6.3.2	Wzrost i pobieranie składników mineralnych przez rośliny uprawiane na glebach serpentynitowej i granitowej.....	123
7.	Podsumowanie wyników i wnioski.....	126
8.	Literatura.....	130
9.	Spis tabel oraz rysunków.....	145
9.1	Spis tabel.....	145
9.2	Spis rysunków.....	147
10.	Załączniki.....	151
10.1	Zestawienie skrótów nazw gatunków roślin użytych w pracy.....	151
10.2	Wykaz parametrów analiz statystycznych dotyczący danych z tabel: 4, 5, 6, 10...	153
10.3	Wykaz parametrów analiz statystycznych dotyczący danych z tabeli 15.....	156
10.4	Wykaz parametrów analiz statystycznych dotyczący rysunków 30A–L oraz 31A–L.....	157

## 1. Wstęp

Roślinność Europy związana jest ze strefą lasów liściastych zrzucających liście na zimę. Warunki klimatyczne Centralnej Europy sprzyjają rozwojowi lasów z drzewami przystosowanymi do przetrwania zimy oraz konkurowania o światło w sezonie wegetacyjnym, dlatego naturalne murawy na tych obszarach są rzadkie (Sudnik-Wójcikowska i Cwener 2012, Hejzman i in. 2013).

O odrębności ciepłolubnych muraw na tle innych zbiorowisk decydują takie czynniki jak deficyt wody oraz niska zasobność w składniki pokarmowe, zwłaszcza azotu, ponadto powstają na luźnych glebach, zazwyczaj bogatych w wapń, które w okresie lata ulegają przesuszeniu (Dierschke 1997 za Żołnierz 2007, Aćić i in. 2015). Środkowoeuropejskie ciepłolubne murawy stanowią zbiorowiska roślin, w skład których wchodzi przed wszystkim trawy i byliny dwuliścienne. Nawiązują więc do roślinności stepów występujących w strefie klimatu kontynentalnego. Do powstania stepów przyczyniły się szczególne warunki siedliskowe m.in. związane z okresowymi niedoborami wody, niskimi rocznymi opadami z maksimum przypadającym w okolicy czerwca oraz ujemnym bilansem wodnym (Sudnik-Wójcikowska i Cwener 2012). Typowe zbiorowiska stepów występują głównie w Eurazji, natomiast w Europie Centralnej pojawiają się zbiorowiska o charakterze stepów, których postać jedynie nawiązuje do tamtych. Europejskie zbiorowiska trawiaste mają charakter półnaturalny, a ich przetrwanie przez stulecia zawdzięczają tradycyjnemu użytkowaniu, polegającym głównie na wypasaniu zwierząt. Długofalowa działalność człowieka rozpoczęła się już w okresie przejściowym między mezolitem i neolitem, u początków rolnictwa (Dzwonko i Loster 2008, Hejzman i in. 2013).

Ze względu na warunki klimatyczne murawy kserotermiczne w Polsce mają charakter ekstrapolny, a do ich powstania przyczyniły się specyficzne warunki siedliskowe (Matuszkiewicz 2008). W większości, ciepłolubne murawy w Polsce z klasy *Festuco-Brometea* należą do rzędu *Festucetalia valesiacae*, który zasięgiem obejmuje Europę Wschodnią (Matuszkiewicz 2008). Według Szczęśniak (2003) na Dolnym Śląsku można spotkać, oprócz wymienionych powyżej, również zbiorowiska zaklasyfikowane do rzędu *Brometalia erecti*, które zasadniczo występują na obszarze Europy Zachodniej i Środkowej (Matuszkiewicz 2008). Jednak postać obu typów ma zubożały charakter (Szczęśniak 2003). Do zbiorowisk ciepłolubnych Dolnego Śląska oraz Opolszczyzny należą również kompleksy z roślinnością naskalną.

Dolnośląskie murawy uległy silnej fragmentacji. Zachowane izolowane płyty często o bardzo małej lub wręcz znikomej powierzchni mają jednak istotne znaczenie biocenotyczne w krajobrazach rolniczych. Traktowane dotąd jako nieużytki stały się poważnie zagrożone z powodu podejmowanych działań zmierzających do zagospodarowania ich w odmienny sposób. Narażone są m.in. na zaorywanie, zalesianie, stają się również miejscem składowania np. resztek poźniwnych lub gruzu. Ponadto, wskutek działalności rolniczej na obszarach sąsiednich, dochodzi do eutrofizacji tych pierwotnie ubogich w składniki pokarmowe siedlisk, co w następstwie prowadzi do wkraczania gatunków nitrofilnych i zaburzenia kompozycji gatunkowej typowej dla muraw kserotermicznych. Również wzmożony ruch turystyczny przyczynia się do rujnowania zbiorowisk trawiastych przez zadeptywanie, palenie ognisk, niszczenie roślin, co jest widoczne zwłaszcza na obszarze Masywu Ślęży (Szczęśniak 2003, Żołnierz 2007, Świerkosz 2012).

Dla zachowania zbiorowisk suchych muraw niezbędne jest wdrożenie równoległych działań dotyczących monitorowania ich stanu, ochrony prawnej oraz czynnej (Żołnierz 2007, 2011a, 2011b, Aćić i in. 2015). W celu przeciwdziałania postępującej sukcesji niezbędne jest ekstensywne użytkowanie muraw obejmujące wykaszanie lub wypasanie zwierząt (Dubrávková i Košťál 2012, Roleček i in. 2014). Ochrona tych niezwykle bogatych florystycznie i zanikających zbiorowisk jest kwestią priorytetową. Nawet niewielkie płyty ciepłolubnych muraw są ostoją różnorodności biologicznej zarówno dla roślin jak i zwierząt, zwłaszcza entomofauny (Żołnierz 2007, 2011a). Dzięki ich występowaniu możliwe jest przetrwanie gatunków rzadkich, nierozłącznie związanych z tego typu siedliskiem, m.in. turzycy niskiej *Carex humilis*, przytulii stepowej *Galium valdepilosum*, czosnku skalnego *Allium montanum*, owsicy łąkowej *Avenula pratensis*, kostrzewy bladej *Festuca pallens* (Szczęśniak 2003, Żołnierz 2011a).

Zbiorowiska ciepłolubnych muraw przeważnie związane są z siedliskami wapiennymi, jednak wykształciły się również na odmiennych podłożach (Dubrávková i Košťál 2012), w tym bogatych w metale ciężkie (Becker i Brändel 2007, Brković i in. 2015, Woch i in. 2016). Do takich zbiorowisk należą murawy wykształcone na serpentynitach. Są to niezwykle cenne siedliska ze względu na ich unikatowy charakter florystyczny jak i geomorfologiczny. Związane są ze stosunkowo rzadko występującymi skałami serpentynitowymi w Polsce i na świecie. Wystąpienia serpentynitów w Polsce ograniczają się do obszaru Dolnego Śląska, podczas gdy największe w Europie znajdują się na

Półwyspie Bałkańskim (Salihaj i in. 2018), zaś na świecie w Azji Południowej i Południowo-Wschodniej (Galey i in. 2017). Geochemia oraz mineralogia skał serpentynitowych znacząco wpływają na właściwości gleb z nich wytworzonych (Weber 1980, Chardot 2007, Kierczak i in. 2016, Pędziwiatr i in. 2018). Najbardziej rozpoznawalną strukturą występowania skał serpentynitowych na powierzchni kontynentów stanowi forma ofiolitów, czyli odsłoneń skorupy i płaszcza oceanicznego, które są typowe dla większości gór warstwowych na całym świecie (Malpas 1992), również dla Sudetów. Skały serpentynitowe powstały wskutek uwodnienia minerałów żelazowo-magnezowych ultrazasadowych skał w warunkach wysokiego pH >10, stosunkowo niskiej temperatury (< 530°C) oraz niskiego ciśnienia parcjalnego CO<sub>2</sub> (Roberts i Proctor 1992). Zbudowane są głównie z jednego lub kilku minerałów z grupy serpentynu, tj. lizardytu, antygorytu lub chryzotyłu (Weber 1980, Malpas 1992). Mianem gleb serpentynitowych określa się również te wykształcone na perydotycie, czyli prekursorze serpentynitu, choć istnieją różnice geomorficzne i pedologiczne między tymi dwiema ultramaficznymi skałami (Alexander 2009). To uproszczenie stosowane jest na potrzeby badań flory ze względu na znikome różnice między roślinnością na nich występującą (Alexander 2009).

Skały i gleby serpentynitowe wykazują dużą zmienność zależnie od miejsca ich występowania (Proctor i Nagy 1993, Żołnierz 2007, Kierczak i in. 2021). Łączy je zespół cech, określanych mianem kompleksu serpentynitowego (dosł. serpentnine syndrome; Jenny 1980, D'Amico i Previtali 2012), przez innych nazywany także problemem serpentynitowym (Brooks 1987) lub czynnikiem serpentynitowym (Salihaj i Bani 2018). Do specyficznych cech zalicza się wysoką zawartość magnezu przy niskiej zasobności w wapń, z czego wynika odwrócenie między nimi proporcji w glebie oraz podwyższoną zawartość metali ciężkich (Ni, Cr, Co). Do niespecyficznych właściwości gleb serpentynitowych należy szereg cech fizyko-chemicznych gleb, w tym duży udział frakcji szkieletowych, niska pojemność wodna, niedobory podstawowych składników pokarmowych (N, P, K) (Walker 1954, Brooks 1987, Brady i in. 2005, Kierczak i in. 2021). Jak podaje literatura siedliska serpentynitowe odznaczają się zróżnicowanym stopniem natężenia poszczególnych czynników kompleksu serpentynitowego (m.in. Proctor i Woodel 1971, Brooks 1987). Z tego względu w różnych konfiguracjach mogą mieć odmienny wpływ na rośliny.

Na ogół własności gleb serpentynitowych stwarzają niekorzystne warunki do wzrostu i rozwoju roślin. Niemniej jednak szata siedlisk serpentynitowych nie ustępuje pod względem bogactwa gatunkowego roślinności tożsamyh zbiorowisk nieserpentynitowych

(Proctor i in. 2000, Brković i in. 2015), co więcej, w jej składzie występują gatunki rzadkie, włączając w to endemity (Kruckeberg 1951, Whittaker 1954, Reeves i in. 1999, Galey i in. 2017). Gleby metalonośne, w tym serpentynitowe, mają bardzo zróżnicowany wpływ na roślinność: od całkowitej toksyczności dla wszystkich roślin wyższych do wspomagania lokalnej flory gatunków odpornych na metale. Wpływ ten zależy od gatunku rośliny, pierwiastka oraz fizycznych i chemicznych właściwości gleby (Reeves i Baker 2000). W wielu pracach dotyczących siedlisk serpentynitowych skoncentrowano się właśnie na biogeochemii metali ciężkich (m.in. Samecka-Cymerman i in. 2009, Alekseeva-Popova i in. 2015, Zlatic i in. 2017, Tomović i in. 2018). Ilość metali ciężkich akumulowanych przez rośliny zależy od wielu czynników, m.in. rodzaju skały macierzystej gleb, zasobności podłoża w metale, proporcji między pierwiastkami w glebie oraz zachodzących pomiędzy nimi interakcji (Bani i in. 2014, Roccotiello i in. 2015, Pędziwiatr i in. 2018).

Spośród potencjalnie toksycznych metali obecnych w glebach serpentynitowych to nikiel w największym stopniu odpowiedzialny jest za stres środowiskowy roślin z siedlisk serpentynitowych. Dzieje się tak ze względu na najwyższe koncentracje dostępnych form niklu w porównaniu do pozostałych metali ciężkich w glebach serpentynitowych. Wspomniany stres środowiskowy należy rozumieć jako reakcję roślin na obecność niklu w podłożu, która prowadzi do zaburzeń metabolicznych, a w konsekwencji również czynności życiowych roślin. Jest także przyczyną niedoborów składników pokarmowych w wyniku ich współzawodnictwa podczas pobierania lub translokacji w roślinach (Hassan i in. 2019). Niekorzystne działanie tego metalu dotyczy wielu procesów fizjologicznych. Powoduje więdnienie roślin, chlorozy, deformacje, a nawet martwicę tkanek (Seregin i Kozhevnikova 2006, Hassan i in. 2019). Etiologia tych zmian dotyczy modyfikacji aktywności enzymów biorących udział w licznych procesach życiowych, w tym fotosyntezy, zmian przepuszczalności błon komórkowych, zahamowania wzrostu i morfogenezy w wyniku spadku plastyczności ścian komórkowych (nadmierna lignifikacja), zaburzeń podziału komórkowego i innych (Seregin i Kozhevnikova 2006). Jednym z objawów toksycznego oddziaływania niklu są zaburzenia wzrostu korzeni. Dochodzi do nich w wyniku nagromadzenia się reaktywnych form tlenu (ROS ang. reactive oxygen species), dezintegracji mikrotubul w komórkach strefy wydłużeniowej, a także zaburzeń działania transporterów auksyn, szczególnie PIN2, w merystemie wierzchołkowym korzenia (Lešková i in. 2020).



Gatunki zasiedlające gleby serpentynitowe tolerują podwyższone zawartości niklu dzięki mechanizmom adaptacyjnym. Adaptacje roślin do środowiska bogatego w metale ciężkie opierają się na strategii wykluczania metali przez system korzeniowy (ekskluzja) lub unieruchomienie ich w korzeniach roślin (Vicić i in. 2014, Tomović i in. 2018). Translokacja metali do liści, a następnie ich opadanie umożliwia detoksykację roślin (Vergnano-Gambi i in. 1982, Tomović i in. 2018). Inne strategie polegają na regulacji (enzymatycznych i nie-enzymatycznych) na poziomie funkcjonowania komórki, np. przez podwyższoną pojemność przeciwutleniającą, czyli zdolność do neutralizacji reaktywnych form tlenu (ROS) (Veatch-Blohm i in. 2017, Stanisavljević i in. 2018). Są doniesienia wskazujące na istotną rolę mikoryzy w detoksykacji niklu (Proctor i Nagy 1993, Sujkowska-Rybkowska i in. 2020), ale i przeczące temu (Doherty i in. 2008).

Stres środowiskowy wywołany właściwościami siedlisk serpentynitowych dotyczy także wysokich zawartości magnezu z równoczesną niską zasobnością gleby w wapń. Gatunki zasiedlające gleby serpentynitowe posiadają przystosowania, umożliwiające wystarczające pobieranie wapnia nawet przy nadmiernych ilościach magnezu lub ogólnie tolerują niską zasobność wapnia (Walker i in. 1955, Whittaker 1954, Veatch-Blohm i in. 2013). Jedną ze strategii związaną z przewagą magnezu nad wapniem w podłożu jest selektywna translokacja wapnia z korzeni do pędów, pozwalająca na utrzymanie niskiego stosunku Mg/Ca w pędach roślin (O'Dell i Claassen 2006). Ponadto większość serpentynofitów odznacza się stosunkowo wysokim poziomem tolerancji na podwyższone zawartości magnezu w podłożu (Asemaneh i in. 2007).

Wśród metalofitów istnieje wiele gatunków zdolnych do hiperakumulacji niklu, czyli anormalnego akumulowania tego metalu. Dla niklu wartość graniczną zaproponowali Brooks i in. (1977 cyt. za Reeves i Baker 2000), która wynosi  $1000 \text{ mg kg}^{-1}$  s.m. pędów. Rośliny hiperakumulujące nikiel wykształciły wydajne mechanizmy fizjologiczne, które umożliwiają szybką translokację z korzeni do pędów oraz unieruchomienie jonów tego metalu, który w roślinach występuje głównie w postaci  $\text{Ni}^{2+}$  (Deng i in. 2018). Obecnie na świecie rozpoznano około 450 hiperakumulatorów niklu. Geograficznie można zaszeregować je do dwóch grup. Pierwsza obejmuje rejony tropikalne i subtropikalne, w których czołowe miejsce pod względem ilości gatunków hiperakumulujących nikiel zajmują Kuba, Nowa Kaledonia, wyspy Indonezji oraz Filipiny. Do drugiej grupy należą tereny śródziemnonorskie począwszy od Portugalii przez Włochy, Bałkany, Turcję i kraje sąsiadujące (Reeves i in. 1999, Kazakou i in. 2010, van der Ent i in. 2013, Reeves i in. 2018).

Zjawisko hiperakumulacji bardzo często występuje u gatunków endemicznych gleb serpentynitowych, czego przykładem są *Geissois pruinosa* z Nowej Kaledonii (Losfeld i in. 2015) lub *Alyssum murale* i *A. corsicum* z rejonów śródziemnomorskich (Broadhurs i Chaney 2016). We florze serpentynitowej Polski brak gatunków endemicznych oraz hiperakumulujących nikiel.

Dolnośląskie siedliska serpentynitowe, mimo ich niewielkiej powierzchni i stosunkowo małego zróżnicowania biocenotycznego oraz wysokiego stopnia przekształceń antropogenicznych większości ekosystemów, dają okazję do interesujących badań ekologicznych. W niniejszej pracy dążono do poznania ekologii gatunków ciepłolubnych muraw i odpowiedzi na pytanie, czy opanowanie siedlisk dolnośląskich serpentynitów wymagało u nich wykształcenia szczególnych cech przystosowawczych do specyficznych czynników edaficznych. Nawet niewielkie płyty muraw stanowią ostoje różnorodności biologicznej w krajobrazie kulturowym. Intencją autorki było przede wszystkim poznanie natury osobliwych właściwości siedlisk serpentynitowych i ich konsekwencji ekologicznych. Byłoby jednak wskazane, żeby wyniki badań mogły być również wykorzystane w ochronie tych cennych siedlisk przyrodniczych.

## 2. Cel i zakres pracy

Zbiorowiska ciepłolubnych muraw występujących na serpentynitach mają istotne znaczenie dla różnorodności florystycznej i biocenotycznej obszaru Przedgórze Sudeckiego, a także dla odrębności jego szaty roślinnej na tle regionu. W składzie gatunkowym tych muraw występują gatunki roślin spotykane także w podobnych zbiorowiskach na innych podłożach skalnych. Stało się to przesłanką do podjęcia badań, których celem jest porównawcza analiza reakcji populacji wybranych gatunków z serpentynitów i kontrastowo odmiennych podłoży skalnych (granity, wapienie) na specyficzne czynniki kompleksu serpentynitowego. Badania dotyczyły rozproszonych obiektów, które mają charakter wysp środowiskowych na obszarach rolniczych. Do analiz porównawczych wybrano gatunki występujące na wszystkich trzech rodzajach podłoża geologicznych.

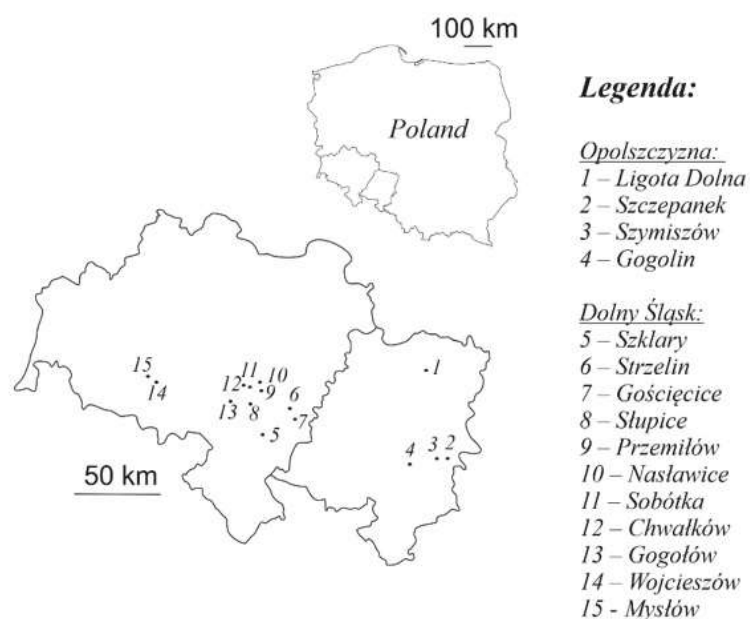
Do głównych zadań badawczych należało:

1. opis i porównanie roślinności muraw badanych na serpentynitach, granitach i wapieniach;
2. poznanie zależności pomiędzy właściwościami siedlisk a kompozycją gatunkową, różnorodnością oraz produktywnością ciepłolubnych muraw z serpentynitów, granitów oraz wapieni;
3. porównanie zdolności do akumulacji badanych pierwiastków (makro-, mikroelementów oraz wybranych pierwiastków śladowych) dla wybranych gatunków wskaźnikowych na naturalnych siedliskach oraz w warunkach doświadczalnych;
4. poznanie tolerancji wybranych gatunków wskaźnikowych reprezentujących populacje serpentynitowe oraz z innych podłoży geologicznych na charakterystyczne właściwości geochemiczne gleb serpentynitowych. Dążono do ustalenia czy u populacji wybranych gatunków z serpentynitów występują przystosowania do specyficznych czynników edaficznych wyrażające się tolerancją na nikiel w różnych konfiguracjach koncentracji magnezu i wapnia oraz pobieraniem tych pierwiastków.

### 3. Charakterystyka obszaru badań

#### 3.1 Lokalizacja badanych obiektów

Powierzchnie badawcze wyznaczono na obiektach, którymi były płaty muraw kserotermicznych, występujące jako fragmenty roślinności o charakterze półnaturalnym. W większości występują one jako siedliska antropogeniczne w otoczeniu kamieniołomów, na nieużytkowanych łąkach i pastwiskach oraz jako powierzchnie marginalne (nieużytki) w krajobrazie rolniczym. Przy wyborze obiektów na wapieniach i granitach kierowano się kryterium podobieństwa składu gatunkowego do muraw z serpentynitów. Wybierano murawy z gatunkami obecnymi na stanowiskach z serpentynitów. Z zestawu wspólnych gatunków (por. rys. 10) do szczegółowych badań porównawczych wybrano takie, które występowały w stosunkowo licznych populacjach, tak by nie stwarzać ryzyka ich zaniku na stanowiskach. Wyznaczono łącznie 76 powierzchni badawczych: 20 na wapieniach, 24 na granitach oraz 32 na serpentynitach, w obrębie wzgórz usytuowanych w granicach trzech makroregionów – Przedgórze Sudeckiego (332.1), Sudetów Zachodnich (332.3) oraz Wyżyny Śląskiej (341.1) (Kondracki 2001).



Rys. 1. Rozmieszczenie badanych obiektów

Stanowiska serpentynitowe, które znajdowały się w rejonie Sobótki, Nasławic, Przemilowa, Słupic oraz Gogołowa należą do mezoregionu Masywu Ślęży w obrębie Przedgórze Sudeckiego. W obszarze tego mezoregionu wyznaczono również powierzchnie

badawcze w granitowej części Masywu Ślęży – w Chwałkowie. Większość powierzchni nagranitowych była usytuowana na wzgórzach Strzelińskich – w Gościęcicach i okolicach Strzelina, należących do mezoregionu Wzgórz Niemczańsko-Strzelińskich i makroregionu Przedgórze Sudeckiego. Nawapienne stanowiska wyznaczono na obszarze Sudetów Zachodnich w mezoregionie Gór Kaczawskich (Wojcieszów, Mysłów) oraz na terenie Wyżyny Śląskiej (Ligota Dolna, Szczepanek, Szymiszów, Gogolin) w obrębie mezoregionu Chełm (regionalizacja fizycznogeograficzna wg Kondrackiego 2001). Badania prowadzono poza obszarami chronionymi.

Podstawowe dane opisujące lokalizację powierzchni badawczych przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie badanych obiektów. Stanowiska z granitów, serpentynitów i wapieni oznaczono literami G, S i W

Lp.	Symbol stanowiska	Miejscowość	Współrzędne geograficzne	Wysokość m n.p.m.	Jednostka fizjograficzna
1	G1	Sobótka	N 50°53.57' E 16°41.76'	209	Masyw Ślęży
2	G2	Sobótka	N 50°53.54' E 16°41.92'	207	Masyw Ślęży
3	G3	Sobótka	N 50°53.58' E 16°41.76'	203	Masyw Ślęży
4	G4	Sobótka	N 50°53.59' E 16°41.73'	201	Masyw Ślęży
5	G25	Sobótka	N 50°53.57' E 16°41.77'	204	Masyw Ślęży
6	G5	Sobótka	N 50°53.83' E 16°42.04'	193	Masyw Ślęży
7	G6	Sobótka	N 50°53.82' E 16°42.06'	193	Masyw Ślęży
8	G7	Sobótka	N 50°53.82' E 16°42.06'	196	Masyw Ślęży
9	G8	Sobótka	N 50°53.84' E 16°42.08'	197	Masyw Ślęży
10	G11	Chwałków	N 50°53.79' E 16°41.07'	182	Masyw Ślęży
11	G12	Chwałków	N 50°53.79' E 16°41.10'	186	Masyw Ślęży
12	G13	Chwałków	N 50°53.78' E 16°41.11'	189	Masyw Ślęży
13	G9	Strzelin	N 50°46.51' E 17°05.44'	165	Wzgórze Niemczańsko-Strzelińskie
14	G10	Strzelin	N 50°46.51' E 17°05.44'	165	Wzgórze Niemczańsko-Strzelińskie
15	G14	Gościęcice	N 50°45.38' E 17°04.87'	227	Wzgórze Niemczańsko-Strzelińskie
16	G15	Gościęcice	N 50°45.38' E 17°04.87'	227	Wzgórze Niemczańsko-Strzelińskie

Lp.	Symbol stanowiska	Miejscowość	Współrzędne geograficzne	Wysokość m n.p.m.	Jednostka fizjograficzna
17	G16	Gościęcice	N 50°45.38' E 17°04.87'	225	Wzgórza Niemczańsko-Strzeleńskie
18	G17	Gościęcice	N 50°45.38' E 17°04.86'	224	Wzgórza Niemczańsko-Strzeleńskie
19	G18	Gościęcice	N 50°45.38' E 17°04.86'	224	Wzgórza Niemczańsko-Strzeleńskie
20	G19	Gościęcice	N 50°45.35' E 17°04.88'	225	Wzgórza Niemczańsko-Strzeleńskie
21	G20	Gościęcice	N 50°45.35' E 17°04.88'	218	Wzgórza Niemczańsko-Strzeleńskie
22	G21	Gościęcice	N 50°45.36' E 17°04.87'	219	Wzgórza Niemczańsko-Strzeleńskie
23	G22	Gościęcice	N 50°45.37' E 17°04.86'	233	Wzgórza Niemczańsko-Strzeleńskie
24	G23	Gościęcice	N 50°45.36' E 17°04.86'	224	Wzgórza Niemczańsko-Strzeleńskie
25	S1	Sobótka	N 50°54.12' E 16°43.76'	197	Masyw Ślęży
26	S2	Sobótka	N 50°54.11' E 16°43.72'	202	Masyw Ślęży
27	S3	Sobótka	N 50°54.11' E 16°43.71'	198	Masyw Ślęży
28	S4	Przemilów	N 50°51.05' E 16°47.16'	270	Masyw Ślęży
29	S5	Przemilów	N 50°51.05' E 16°47.16'	271	Masyw Ślęży
30	S6	Przemilów	N 50°51.05' E 16°47.16'	272	Masyw Ślęży
31	S7	Przemilów	N 50°51.05' E 16°47.16'	273	Masyw Ślęży
32	S15	Gogołów	N 50°49.27' E 16°35.86'	335	Masyw Ślęży
33	S16	Gogołów	N 50°49.28' E 16°35.85'	338	Masyw Ślęży
34	S17	Gogołów	N 50°49.33' E 16°35.64'	325	Masyw Ślęży
35	S18	Gogołów	N 50°49.16' E 16°35.75'	275	Masyw Ślęży
36	S19	Słupice	N 50°49.43' E 16°44.73'	291	Masyw Ślęży
37	S8	Nasławice	N 50°53.08' E 16°48.73'	177	Masyw Ślęży: Kamienny Grzbiet <sup>1</sup>
38	S9	Nasławice	N 50°53.15' E 16°48.75'	189	Kamienny Grzbiet
39	S10	Nasławice	N 50°53.02' E 16°48.81'	191	Kamienny Grzbiet
40	S11	Nasławice	N 50°53.05' E 16°48.80'	190	Kamienny Grzbiet
41	S12	Nasławice	N 50°52.98' E 16°49.82'	183	Kamienny Grzbiet
42	S13	Nasławice	N 50°53.08' E 16°48.73'	170	Kamienny Grzbiet
43	S14	Nasławice	N 50°53.00' E 16°49.83'	169	Kamienny Grzbiet

Lp.	Symbol stanowiska	Miejscowość	Współrzędne geograficzne	Wysokość m n.p.m.	Jednostka fizjograficzna
44	S20	Nasławice	N 50°52.32' E 16°50.22'	182	Kamienny Grzbiet
45	S21	Nasławice	N 50°52.31' E 16°50.21'	169	Kamienny Grzbiet
46	S22	Nasławice	N 50°52.31' E 16°50.21'	172	Kamienny Grzbiet
47	S23	Nasławice	N 50°52.16' E 16°50.02'	174	Kamienny Grzbiet
48	S24	Nasławice	N 50°53.11' E 16°48.86'	173	Kamienny Grzbiet
49	S25	Nasławice	N 50°53.13' E 16°48.94'	173	Kamienny Grzbiet
50	S26	Nasławice	N 50°53.13' E 16°48.94'	173	Kamienny Grzbiet
51	S40	Nasławice	N 50°52.30' E 16°49.92'	169	Kamienny Grzbiet
52	S41	Nasławice N2	N 50°52.31' E 16°49.93'	169	Kamienny Grzbiet
53	S43	Szklary	N 50°39.31' E 16°49.83'	320	Wzgórza Niemczańsko-Strzebińskie
54	S44	Szklary	N 50°39.20' E 16°49.82'	330	Wzgórza Niemczańsko-Strzebińskie
55	S49	Szklary	N 50°39.08' E 16°49.92'	334	Wzgórza Niemczańsko-Strzebińskie
56	S50	Szklary	N 50°39.07' E 16°49.95'	334	Wzgórza Niemczańsko-Strzebińskie
57	W1	Ligota Dolna	N 50°29.05' E 18°07.45'	331	Chełm
58	W2	Ligota Dolna	N 50°29.19' E 18°07.40'	280	Chełm
59	W3	Ligota Dolna	N 50°29.21' E 18°07.36'	276	Chełm
60	W4	Ligota Dolna	N 50°29.20' E 18°07.35'	275	Chełm
61	W5	Ligota Dolna	N 50°28.90' E 18°07.60'	307	Chełm
62	W6	Szymiszów	N 50°31.93' E 18°14.08'	212	Chełm
63	W7	Szymiszów	N 50°32.10' E 18°14.28'	210	Chełm
64	W8	Szczepanek	N 50°31.37' E 18°19.63'	221	Chełm
65	W9	Szczepanek	N 50°31.34' E 18°19.64'	228	Chełm
66	W10	Gogolin	N 50°30.15' E 18°01.85'	187	Chełm
67	W11	Gogolin	N 50°30.13' E 18°01.87'	176	Chełm
68	W12	Wojcieszów	N 50°56.16' E 15°55.89'	428	Góry Kaczawskie
69	W13	Wojcieszów	N 50°56.19' E 15°55.90'	451	Góry Kaczawskie
70	W14	Wojcieszów	N 50°56.16' E 15°55.82'	407	Góry Kaczawskie
71	W15	Wojcieszów	N 50°57.22' E 15°55.57'	381	Góry Kaczawskie

Lp.	Symbol stanowiska	Miejscowość	Współrzędne geograficzne	Wysokość m n.p.m.	Jednostka fizjograficzna
72	W16	Wojcieszów	N 50°57.29' E 15°55.64'	412	Góry Kaczawskie
73	W17	Mysłów	N 50°55.85' E 15°59.83'	541	Góry Kaczawskie
74	W18	Mysłów	N 50°55.85' E 15°59.83'	541	Góry Kaczawskie
75	W19	Mysłów	N 50°55.86' E 15°59.74'	538	Góry Kaczawskie
76	W20	Mysłów	N 50°55.86' E 15°59.73'	539	Góry Kaczawskie

<sup>1</sup>Kamienny Grzbiet leży w obrębie jednostki fizjograficznej Masywu Ślęży, nazwy zwyczajowej użyto w celu wyodrębnienia obiektów położonych na izolowanych wzniesieniach w stosunku do głównej części masywu

## 3.2 Geologia i rzeźba obszaru badań

### 3.2.1 Przedgórze Sudeckie – Masyw Ślęży (332.13), Wzgórza Niemczańsko-Strzelińskie (332.14)

Przedgórze Sudeckie do końca oligocenu było integralną częścią Sudetów, jednak po tym okresie, w wyniku aktywności tektonicznej, blok Przedgórze uległ przemieszczeniu. Jest to równina z kilkoma wzniesieniami, z których najwyższym jest Masyw Ślęży. W obrębie makroregionu, wyznaczono siedem mezoregionów (Kondracki 2001). Obszar ten leży w granicach bloku przedsudeckiego, w którym centralne miejsce zajmuje kra sowiogórska o powierzchni około 600 km<sup>2</sup>, wyniesiona w okresie orogenezy warcyjskiej. Od wschodu graniczy ze strefą Niemczy, od północy z masywem Ślęży, natomiast na południu z gabrem Nowej Rudy (Stupnicka i Stempień-Sałek 2016).

Mezoregion Masywu Ślęży należy do najwyższego terenu Przedgórze Sudeckiego z kulminacyjnym szczytem Ślęży (718 m n.p.m.) wyniesionym o około 500 m ponad poziom Niziny Śląskiej. Masyw Ślęży stanowi największą część ofiolitu sudeckiego (Żelaźniewicz 2015). Jest to fragment wypiętrzonego grzbietu skorupy oceanicznej, który uległ procesom denudacyjnym. Południową, niższą część Masywu Ślęży tworzą wzniesienia zbudowane z serpentynitów, od zachodu Wzgórza Kielczyńskie z najwyższym wzniesieniem Szczytną (466 m n.p.m.) oraz od południa Wzgórza Oleszeńskie z Radunią (573 m n.p.m.). Izolowanymi od głównej części ofiolitu ślężańskiego odsłonięciami serpentynitu są mniejsze masywy w Sobótce (bez nazwy) i Kamienny Grzbiet (kulminacja 201 m n.p.m.) w rejonie wsi Nasławice – Jordanów Śląski. Na terenie Kamiennego Grzbietu w Nasławicach,



znajduje się czynny kamieniołom serpentynitu, używanego jako surowiec drogowy i drugi nieczynny obecnie od strony Jordanowa.

Skały granitowe w Masywie Ślęży są częścią Masywu Strzegom-Sobótka. Powstały w okresie dolnego permu, około 266 milionów lat temu (Depciuch 1971 za Majerowicz 1979). Ze względu na bardzo dobre właściwości fizyczno-techniczne granitoidy Masywu Strzegom-Sobótka są cennym surowcem skalnym o dużym znaczeniu gospodarczym, wykorzystywanym do produkcji kamieni drogowych, budowlanych oraz kruszywa. Złoża te były już eksploatowane w XVII wieku (Majerowicz 1979), a współcześnie użytkuje się około 43 złóż, głównie w okolicy Strzegomia (Sachanbiński i in. 2015).

Powierzchnie badawcze wyznaczano w obrębie znalezionych płatów muraw w większości przypadków na skarpach nieczynnych wyrobisk serpentynitu w okolicach miejscowości: Gogołowa, Słupic, Nasławic Przemysłowa, Sobótka oraz Szklar. Powierzchnie nagranitowe wytyczono w północno-zachodniej oraz północnej części podnóża Ślęży – na terenie wsi Chwałków oraz Sobótka, także w sąsiedztwie wyrobisk tego surowca.

Wzgórza Niemczańsko-Strzelińskie stanowią rozległy obszar Przedgórze Sudeckiego o zróżnicowanej rzeźbie terenu, co stanowiło podstawę do wydzielenia wielu mikroregionów (Kondracki 2001). W budowie geologicznej Wzgórz Niemczańsko-Strzelińskich można wyróżnić granity, skały metamorficzne, jak również bazalty (Migoń i Kasprzak 2015). Wzgórza Strzelińskie częściowo utworzone są z granitoidów wykształconych w późnym paleozoiku. Granitoidową intruzję w części północnej w okolicy Strzelina stanowią granity, w części południowej natomiast, dominują tonality i dioryty kwarcowe. Strzelin słynie z wyrobisk granitu, który występuje tam w dwóch odmianach: biotytowej i dwułyżczkowej. Wzgórza Niemczańskie utworzone są z granitów, sjenitów, bazaltów oraz skał metamorficznych. Wzgórza Szklarskie, z najwyższym szczytem Siodlastą (384 m n.p.m.), położone we wschodniej części Wzgórz Niemczańskich, utworzone są z młodopaleozolicznych serpentynitów (Staffa 2008a). W miejscowości Szklary eksploatowano złoża nikłonośnych rud, w których zawartość niklu dochodziła nawet do 12%, a średnio wynosiła około 1–2% (Staffa 2008b). Powierzchnie badawcze wyznaczono tam na murawach kserotermicznych wchodzących w skład nieużytkowanych pastwisk oraz w wyrobiskach nieczynnych kamieniołomów w północnej części Masywu Szklar.

### **3.2.2 Sudety Zachodnie – Góry Kaczawskie (332.35)**

Góry Kaczawskie leżą w obrębie Sudetów Zachodnich i rozciągają się między doliną rzeki Bóbr na zachodzie a Nysy Szalonej na wschodzie. Na tle dominującego w tej części Sudetów granitowego bloku Karkonoskiego Góry Kaczawskie odznaczają się dużym zróżnicowaniem budowy geologicznej. Tworzą je cztery rozległe masywy – Grzbiet Północny (kulminacja 714 m n.p.m.), Grzbiet Południowy (kulminacja 720 m n.p.m), Grzbiet Mały (kulminacja 561 m n.p.m) i Grzbiet Wschodni (671 m n.p.m). W paśmie Grzbietu Wschodniego, ciągnącego się na długości około 15 km - znajduje się zbudowany z wapieni masyw Miłka z kopułą (596 m) górującą nad Wojcieszowem. Charakterystycznym elementem rzeźby terenu są liczne zjawiska krasowe oraz jaskinie, zlokalizowane głównie w okolicach Wojcieszowa. W bardzo urozmaiconej budowie geologicznej Gór Kaczawskich przeważają zieleńce, natomiast w okolicy Wojcieszowa wapienie krystaliczne (Migoń i Kasprzak 2015). Są to w głównej mierze skały staropaleozoiczne, które uległy sfałdowaniu podczas orogenezy kaledońskiej, a następnie przemieszczeniu w późniejszych fazach górotwórczych (Kondracki 2001).

Działalność człowieka, związana z przemysłem wydobywczym, w znacznym stopniu wpłynęła na rzeźbę terenu. Na terenie Gór Kaczawskich występują, najliczniej z całego terenu Sudetów, wyrobiska skalne. Złoża skał węglanowych eksploatowano dla celów przemysłu hutniczego, wapienniczego, chemicznego lub spożywczego. Były wykorzystywane także do celów dekoracyjnych, zwłaszcza marmury wojcieszowskie w XVIII wieku (Sawicki 1979).

Powierzchnie badawcze wyznaczono na terenie nieczynnych kamieniołomów wapienia „Miłek” oraz „Gruszka” w Wojcieszowie, a także około 4 km na południe w Mysłowie.

### **3.2.3 Wyżyna Śląska – Chełm (341.11)**

Mezoregion Chełmu stanowi przedłużenie Garbu Tarnogórskiego i znajduje się między Równiną Opolską a Kotliną Raciborską. Utworzony jest z dolomitów i wapieni triasowych. Najwyższym punktem Chełmu jest Góra Św. Anny (400 m n.p.m.) położona na szczątkach komina wulkanicznego (Kondracki 2001). Garb Chełmu powstał wskutek ruchów tektonicznych w trzeciorzędzie związanych z fałdowaniem alpejskim. Doszło wtedy do wypiętrzenia mas skalnych z karbonu i triasu (Stefaniak i in. 2008). Na obszarze przyległym do Góry Świętej Anny pozyskiwano wiele surowców skalnych, takich jak

nefelinity, piaski i żwiry czy krzemienie, jednak triasowy wapień miał największe znaczenie gospodarcze. Wykorzystywano go jako materiał budulcowy. Występował w postaci skalnych płyt płytko zalegających pod warstwą gleby. Wapienie wykorzystywano również do produkcji wapna oraz cementu. Wiele nieczynnych kamieniołomów wapieni triasowych znajduje się w okolicach Góry Świętej Anny, m.in. na terenie Gogolina, Ligoty Dolnej, Szczepanka oraz Szymiszowa (Niedźwiedzki i in. 2012), w obrębie których wyznaczono powierzchnie badawcze (por. rys. 1 oraz tab. 1).

### **3.3 Klimat**

#### **3.3.1 Przedgórze Sudeckie – Masyw Ślęży (332.13), Wzgórza Niemczańsko-Strzelińskie (332.14)**

Przedgórze Sudeckie, ze względu na warunki klimatyczne, zaliczane jest do Regionu Dolnośląskiego Środkowego (R-XXIV) (Woś 1999). Cechuje się on dość częstym występowaniem dni przymrozkowych, zwłaszcza bez opadu, natomiast na tle regionu, mroźna pogoda jest rzadziej notowana (Woś 1999). Na czynniki kształtujące warunki klimatyczne Przedgórze Sudeckiego wpływają głównie Niż Islandzki i Wyż Azorski (Staffa 2005). Charakterystyczną cechą klimatu tego rejonu jest występowanie lokalnych wiatrów, spośród których najbardziej znanym jest fen, na który wpływa rzeźba terenu (Sobik 2005). W okolicy Masywu Ślęży odnotowuje się większe zachmurzenie, również częściej występują opady lub burze. Średnia miesięczna temperatura dla tego rejonu wynosi około 8 °C. Średnie roczne opady wahają się w przedziale 630–770 mm, w zależności od rejonu Przedgórze (Staffa 2005).

#### **3.3.2 Sudety Zachodnie – Góry Kaczawskie (332.35)**

Klimat Sudetów Zachodnich wpisuje się w warunki sąsiadujących pasm górskich. Na lokalne formowanie się klimatu wpływają układ pasm górskich oraz układ kotlin.

Góry Kaczawskie pod względem klimatu zaliczane są do II Regionu Jeleniogórskiego, do piętra b, czyli umiarkowanie ciepłego (Głowicki i in. 2005 – podział Sudetów wg A. Schmucka 1960). Obejmuje on obszary na wysokości 450–600 m. n.p.m. i charakteryzuje się wydłużonym okresem trwania zimy termicznej, która kończy się w pierwszej dekadzie marca. Średnia roczna temperatura dla okolic Wojcieszowa, położonego w sąsiedztwie powierzchni badawczych, wynosi 7.5°C, a średnie roczne opady (styczeń–

grudzień) 800 mm. Pokrywa śnieżna utrzymuje się przez około 60 dni, a czas trwania meteorologicznego okresu wegetacyjnego wynosi około 200 dni (Głowicki i in. 2005).

### **3.3.3 Wyżyna Śląska – Chełm (341.11)**

Warunki pogodowe Opolszczyzny wpisują się w cechy klimatu umiarkowanego o cechach przejściowych między wariantem morskim a kontynentalnym (Stefaniak i in. 2008). Zgodnie z podziałem Polski na regiony klimatyczne według Wosia (1999) obszar ten należy do Regionu Dolnośląskiego Południowego (R-XXV), który wyróżnia się na tle rejonu mniejszą liczbą dni z przymrozkami lub mrozami. Przeważa pogoda umiarkowanie ciepła.

Obszar Chełmu jest jednym z najbardziej usłonecznionych rejonów województwa opolskiego. Wartość średniorocznego usłonecznienia rzeczywistego równa jest około 1400 godzin rocznie. Średnia roczna temperatura w styczniu wynosi od -3 do -2 °C, natomiast w lipcu 17–18 °C. Roczne sumy opadów tego rejonu wynoszą 700–750 mm. Przeważają wiatry z kierunków północnego oraz zachodnio-północnego (Stefaniak i in. 2008).

## **3.4 Roślinność**

### **3.4.1 Przedgórze Sudeckie – Masyw Ślęży (332.13), Wzgórza Niemczańsko-Strzelińskie (332.14)**

Przedgórze Sudeckie należy do Podprowincji Hercyńsko-Sudeckiej, Działu Sudeckiego w obrębie Prowincji Górskiej. Okręg Pogórza i Przedgórze Sudeckiego, ustalony według granic geobotanicznych, obejmuje m.in. podokręgi Ślężański oraz Niemczańsko-Strzeliński (Szczęśniak i Kącki 2015). Wskutek działalności człowieka roślinność uległa synantropizacji. Wykształciły się zastępcze zbiorowiska, w tym bory świerkowe lub sosnowe, które gatunkowo różnią się od roślinności potencjalnej dla tego rejonu. Zachowane fragmenty zbiorowisk zgodne z roślinnością potencjalną, to świetliste dąbrowy z dębem bezszypułkowym (*Quercus petraea*) oraz buczyny, które zostały w większości wyparte przez monokultury świerkowe (Żołnierz 2011a). Roślinność chroniona jest w dwóch rezerwatach Łąka Sulistrowicka i Góra Radunia. W ostatnim czasie w górnych partiach Raduni doszło do wielkopowierzchniowego wylesienia w obrębie sztucznych świerczyn.

Ciepłolubne murawy cechuje bogactwo roślin zielnych, często są to gatunki chronione. Na obszarze Masywu Ślęży oraz Wzgórz Niemczańsko-Strzelińskich stwierdzono obecność krytycznie zagrożonych gatunków roślin (CR) dla Dolnego Śląska w

części związanej z roślinnością ciepłolubnych muraw: marzanki pagórkowej (*Asperula cynanchica*) oraz turzycy niskiej (*Carex humilis*), a także czyścica prostej (*Stachys recta*) – gatunku zagrożonego (EN). Na opisywanym obszarze występuje również głowienka wielkokwiatowa (*Prunella grandiflora*), zaliczana do gatunków narażonych (VU) w tym rejonie (Szczęśniak 2003). Na obszarze Masywu Ślęży wykształciły się bogate zbiorowiska muraw, z których rzadkością są murawy serpentynitowe w składzie z owsicą łąkową (*Avenula pratensis*) (Szczęśniak i Kącki 2015). Płaty muraw często występują na skarpach nieczynnych wyrobisk skalnych lub jako niewielkie polany w lasach.

Na terenie Masywu Ślęży występuje większa część stanowisk tzw. paproci serpentynitowych, do których należą gatunki z rodzaju zanokcica *Asplenium*: *A. adulterinum*, *A. cuneifolium* i *A. adiantum-nigrum*. Stanowiska te chronione są jako użytki ekologiczne. Wymienione paprocie mają nieliczne izolowane stanowiska również na odsłonięciach serpentynitów w głównym pasmie sudeckim. Są osobliwością florystyczną wyróżniającą Sudety i ich Przedgórze w skali kraju (Żołnierz 2011a).

### **3.4.2 Sudety Zachodnie – Góry Kaczawskie (332.35)**

Okręg Sudetów Zachodnich jako jednostka geobotaniczna należy do Prowincji Górskiej, Podprowincji Hercyńsko-Sudeckiej. Roślinność tego obszaru cechuje występowanie gatunków atlantyckich oraz subatlantyckich. Szata roślinna podokręgu Gór Kaczawskich nie wykazuje piętrowości, ponieważ są to niskie góry, osiągające wysokość do 750 m n.p.m. Góry Kaczawskie ze względu na urozmaiconą budowę geologiczną charakteryzują się ogromnym bogactwem rozmaitych siedlisk. (Szczęśniak i Kącki 2015). Występują tutaj gatunki wapieniolubne, często rzadkie, takie jak storczyk drobnokwiatowy (*Orchis ustulata*), buławnik czerwony (*Cephalanthera rubra*), goryczuszka gorzkawa (*Gentianella amarella*) i wiele innych (Kwiatkowski 2006b). Jedynie w tym rejonie Sudetów znajdują się stanowiska jęczycznika zwyczajnego (*Phyllitis scolopendrium*) (Kącki i in. 2003). Na kształt szaty roślinnej Gór Kaczawskich wpływa istotnie zróżnicowanie geologiczne, którego konsekwencją jest duża różnorodność właściwości gleb. Zależnie od rodzaju podłoża wykształciły się różne zespoły roślinne. Na występujących w przewadze glebach kwaśny lub obojętnych znajdują się dąbrowy, buczyny, lasy iglaste oraz dębowo-grabowe, a także murawy naskalne. Jako zbiorowiska zastępcze na tych terenach pojawiają się łąki, murawy napiaskowe lub zbiorowiska synantropijne. Na rędzinach i prarędzinach bogatych w węglan wapnia występują zbiorowiska kalcylfilne, zwłaszcza ciepłolubne buczyny oraz kseryczne

zarośla i murawy. Istnieją również niewielkie powierzchnie z glebami o podwyższonej zawartości metali ciężkich, zasiedlone przez lasy liściaste, zbiorowiska półnaturalne, łąki, murawy, zarośla i inne (Kwiatkowski 2006a). W górnych partiach Gór Kaczawskich rosną wprowadzone przez człowieka drzewostany świerkowe, towarzyszą im łąki, poniżej występują lasy liściaste oraz pola uprawne. W obrębie Gór i Pogórza Kaczawskiego, m.in. na terenie gminy Wojcieszów, znajdują się obszary chronione włączone do sieci Natura 2000, a także rezerwaty. Szczególne walory przyrodnicze zawdzięczają wyjątkowemu bogactwu siedlisk przyrodniczych (25 typów siedlisk) w tym ciepłolubnych buczyn storczykowych (\*9150), skał wapiennych i neutrofilnych z roślinnością pionierską (\*6110) lub podgórskich i wyżynnych rumowisk wapiennych ze zbiorowiskami ze *Stipion calamagrostis* (\*8160), a także występowaniu gatunków roślin oraz zwierząt szczególnej ochrony, m.in. paproci włosocienia delikatnego (*Trichomanes speciosum*), która występuje tutaj na jedynym stanowisku w Polsce (Świerkosz i Szczęśniak 2012).

### 3.4.3 Wyżyna Śląska – Chełm (341.11)

Mezoregion Chełmu usytuowany w obszarze makroregionu: Wyżyny Śląskiej (Kondracki 2001) leży na terenie bogatym w surowce mineralne. Z eksploatacją złóż wiąże się wysoki poziom uprzemysłowienia rejonu oraz duże zagęszczenie ludności. Niewątpliwie czynniki te wpływają niekorzystnie na roślinność obszaru. W rejonie Chełmu wykształciły się nawapienne zbiorowiska ciepłolubnych roślin. Niektóre z nich objęte są prawną ochroną, jak na przykład rezerwat florystyczny „Ligota Dolna”. Ochroną objęte są także zbiorowiska leśne, takie jak „Kamień Śląski” chroniący część lasu mieszanego z jarzębem brekinią w składzie oraz „Płużnica” z okazałymi bukami i grabami (Kondracki 2001).

Siedliska gatunków ciepłolubnych Śląska Opolskiego położone są głównie w obrębie dwóch rejonów, z czego jednym z nich stanowi Masyw Chełmu. Wapienne stanowiska naskalne są miejscem występowania pionierskich gatunków takich jak czosnek skalny (*Allium montanum*), rojownik pospolity (*Jovibarba sobolifera*) lub kostrzewa sina (*Festuca pallens*) (Szczęśniak 2004).

W krajobrazie Chełmu, leżącego w obrębie Śląska Opolskiego przeważają pola uprawne i choć są to antropogeniczne zbiorowiska, to warto zwrócić uwagę na obecność zespołów roślinnych związanych z występowaniem gleb wapiennych. W rejonie Chełmu znajduje się wiele wyrobisk wapieni, którym towarzyszą zespoły z podbiałem pospolitym i wiechliną spłaszczoną *Poo-Tussilaginatum farfarae* (Nowak 2004). W miejscach suchych,

ciepłych o wystawie południowej lub południowo-zachodniej Masywu znajdują się również murawy kserotermiczne (klasa *Festuco-Brometea*) z rzadkimi gatunkami: szafirkiem miękkołistnym (*Muscari comosum*), przewiercieniem sierpowatym (*Bupleurum falcatum*) lub zarazą czerwoną i przytuliową (*Orobancha lutea* i *O. caryophyllacea*) (Szczęśniak 2004).

## 4. Materiał i metody

### 4.1 Prace terenowe

#### 4.1.1 Badania wpływu właściwości siedlisk na kompozycję i różnorodność gatunkową roślinności ciepłolubnych muraw

Badania terenowe przeprowadzono w okresie od lipca do sierpnia w 2014 oraz o tej samej porze w 2015 roku. Obiekty badawcze wybrano w obrębie płatów ciepłolubnych muraw występujących na serpentynitach, granitach oraz wapieniach ze wspólnym zestawem gatunków (por. rys. 10). Do najczęstszych gatunków, wspólnych dla wszystkich podłoży, należały między innymi: wilczomlecz sosnka (*Euphorbia cyparissias* L.), krwawnik pospolity (*Achillea millefolium* L.), przytulia właściwa (*Galium verum* L.), macierzanka zwyczajna (*Thymus pulegioides* L.), biedrzyca mniejsza (*Pimpinella saxifraga* L.), jastrzębiec kosmaczek (*Hieracium pilosella* L.), dziurawiec zwyczajny (*Hypericum perforatum* L.), komonica zwyczajna (*Lotus corniculatus* L.), a także gatunki traw z rodzaju kostrzewa (*Festuca* sp.) zaliczone do agregacji *F. valesiaca* agg. oraz *F. ovina* agg. (por. rozdz. 4.3.1.1). Wyznaczono łącznie 76 powierzchni badawczych o wymiarach 1×1 m, które w poszczególnych płatach wybierano losowo. Losowość ograniczono w ten sposób, że powierzchni badawczych nie lokowano w zewnętrznych partiach płatów w celu uniknięcia oddziaływań brzeżnych na styku z sąsiednimi zbiorowiskami roślinnymi. Na każdej powierzchni wykonano zdjęcie fitosocjologiczne. Ilościowość gatunków wyrażano w skali procentowej. Przy opisie roślinności posłużono się kwadratową ramą o boku 1 m, z wnętrzem podzielonym na pola 10×10 cm. Pozwoliło to na precyzyjne szacowanie pokrycia przez dany gatunek z dokładnością poniżej 1%. Wszystkie nazwy gatunków w niniejszej pracy podano według Mirka i in. (2002).

Badania obejmowały także pobranie prób biomasy roślinności z warstwy zielnej oraz mszysto-porostowej. Nadziemne części pobierane były w czterech powtórzeniach z losowo wybranych miejsc w obrębie powierzchni badawczej z wykorzystaniem ramki o wymiarach 10×10 cm.

Jednocześnie z badaniami roślinności rejestrowano parametry siedliskowe związane z topografią. Za pomocą odbiornika GPS określano współrzędne geograficzne powierzchni badawczych oraz wysokość hipsometryczną. Wystawę określano z użyciem kompasu, kąt nachylenia stoku szacowano z wykorzystaniem klinometru. Dla każdej powierzchni



określano także miąższość gleby, za pomocą skalowanego stalowego ostrza, nakłuwając ją w pięciu miejscach, według stałego wzoru (rozmieszczenie 5 oczek na kostce do gry). Ponadto do dwóch cylinderków ( $V=100\text{ cm}^3$ ) pobierano próby gleby o nienaruszonej strukturze, w celu określenia jej właściwości fizycznych.

#### **4.1.2 Badania zależności pomiędzy składem mineralnym gleb i roślin z ciepłolubnych muraw**

Z powierzchni badawczych pobierano próby gleb do analiz właściwości fizykochemicznych. Próby składowe pobierano z każdej ćwiartki badanej powierzchni wycinając cylinder z warstwy ryzosfery. Wcześniej z miejsca poboru próby usuwano zalegające na powierzchni nierozłożone szczątki roślin. Cztery próby pobrane z powierzchni badawczej składały się na próbę łączną.

Biomasę nadziemnych części roślin najczęściej występujących w składzie ciepłolubnych muraw pobrano losowo, wyłącznie z obszaru badanej powierzchni ( $1\text{m}^2$ ). Zebrano następujące gatunki: wilczomlec sosnka (*Euphorbia cyparissias* L.), przytulię właściwą (*Galium verum* L.), dziurawiec zwyczajny (*Hypericum perforatum* L.), driakiew żółtą (*Scabiosa ochroleuca* L.), macierzankę zwyczajną (*Thymus pulegioides* L.). Do badań wybrano gatunki wspólne dla muraw z różnych badanych podłoży skalnych.

Przedstawiciel rodziny wilczomleczowatych (*Euphorbiaceae*) wilczomlec sosnka (*Euphorbia cyparissias* L.) występuje jako geofit lub hemikryptofit (Zarzycki i in. 2002). Jest gatunkiem światłolubnym, występuje na suchych, ubogich w azot siedliskach w szerokim zakresie odczynu (Ellenberg i in. 1992). Kwitnie od kwietnia do czerwca (Rutkowski 2008). Gatunek ten jest charakterystyczny dla klasy *Festuco-Brometea* (Matuszkiewicz 2008).

Przytulia właściwa (*Galium verum* L.) należy do rodziny marzanowatych (*Rubiaceae*), jest rośliną trwałą, hemikryptofitem (Zarzycki i in. 2002). Występuje na stanowiskach nasłonecznionych i ciepłych, oligotroficznych o odczynie zbliżonym do obojętnego (Ellenberg i in. 1992). Kwitnie od lipca do września (Szafer i in. 1986). Jest to gatunek charakterystyczny dla klasy *Trifolio-Geranietea*, skupiającej zespoły roślinności ciepłolubnych okrajków (Matuszkiewicz 2008).

Dziurawiec zwyczajny (*Hypericum perforatum* L.) jest przedstawicielem rodziny dziurawcowatych (*Hypericaceae*) występuje jako hemikryptofit. Jest półświatłolubnym gatunkiem siedlisk umiarkowanie ciepłych do ciepłych. Preferuje gleby o odczynie

umiarkowanie lub lekko kwaśnym, średnio wilgotne, raczej ubogie w azot (Ellenberg i in. 1992). Dziurawiec kwitnie od czerwca do sierpnia (Szafer i in. 1988). Jest gatunkiem wyróżniającym dla dwóch zespołów *Dauco-Picridetum hieracioidis* oraz *Echio-Melilotetum* w obrębie klasy *Artemisenea Vulgaris*, do której należą zbiorowiska gatunków wieloletnich na siedliskach ruderalnych. Ponadto *H. perforatum* występuje w zbiorowiskach leśnych z dębem bezszypułkowym jako gatunek wyróżniający dla zespołu podgórskich dąbrów acydofilnych (*Luzulo luzuloidis-Quercetum petraeae*) (Matuszkiewicz 2008).

Driakiew żółta (*Scabiosa ochroleuca* L.) z rodziny szczeciowatych (*Dipsacaceae*) występuje jako bylina lub roślina dwuletnia. Jest hemikryptofitem. Występuje na nasłonecznionych, ciepłych i suchych stanowiskach o odczynie zasadowym, ubogich w azot (Ellenberg i in. 1992). Kwitnie od czerwca do października (Rutkowski 2008). Jest gatunkiem charakterystycznym dla klasy *Festuco-Brometea* zwłaszcza dla rzędu *Festucetalia valesiaca* skupiającego wapieniolubne murawy kserotermiczne w Polsce niżowej. Driakiew należy także do gatunków wyróżniających zespół *Scabioso-Genistetum*, który skupia wiele gatunków ciepłolubnych i lekko wapieniolubnych, a zarazem w części charakterystycznych dla ciepłolubnych okrajków *Trifolio-Geranieta* lub muraw kserotermicznych *Festuco-Brometea* (Matuszkiewicz 2008).

Macierzanka zwyczajna (*Thymus pulegioides* L.) jest półkrzewem dorastającym do 25–40 cm (Szafer i in. 1986, Broda i Mowszowicz 1996). Należy do rodziny jasnotowatych (*Lamiaceae*). Pod względem formy życiowej wg Raunkiaera jest chamefitem (Zarzycki i in. 2002). Jest światłolubnym gatunkiem siedlisk o szerokim spektrum termicznym oraz odczynu gleby, skrajnie ubogich w azot. Preferuje stanowiska od suchych do średniowilgotnych – w zależności od pogatunku (Ellenberg i in. 1992). Macierzanka kwitnie od maja do października (Szafer i in. 1986). Jest gatunkiem wyróżniającym dla zespołu napisakowych muraw *Vicio lathyroidis-Potentillion argenteae*, a także dla związku *Airo caryophyllaceae-Festucetum ovinae* skupiającego zwarte, niskie murawy, tolerujące wydeptywanie. Jest także gatunkiem wyróżniającym dla zespołu suchej łąki pienińskiej (*Anthyllidi-Trifolietum montani*) skupiającego zbiorowiska antropogeniczne z dominującymi w składzie trawami oraz roślinami motylkowatymi. Ponadto macierzanka zwyczajna stanowi gatunek wyróżniający dla zbiorowisk ze związku psiar niżowych (*Violion caninae*), które obejmują pastwiska lub słabo nawożone łąki (Matuszkiewicz 2008).

W roku 2015 przeprowadzono zbiór nasion do eksperymentów laboratoryjnych wybranych populacji przytulii właściwej. W wypadku wilczomlecza sosnki pobrano końcowe odcinki pędów wegetatywnych, które następnie ukorzeniano i hodowano w laboratorium przed wykorzystaniem do doświadczeń (Fot. 1).



Fot. 1. Sadzonki wilczomlecza sosnki (Fot. L. Żołnierz)

## 4.2 Badania doświadczalne

### 4.2.1 Badanie zależności między zawartością niklu oraz stosunkiem Mg/Ca w pożywce a wzrostem i pobieraniem składników mineralnych przez rośliny z różnych podłoży geologicznych

W 2016 roku przeprowadzono doświadczenie w komorze klimatycznej firmy Sanyo. Badano wpływ niklu przy zmiennym stosunku stężeń Mg i Ca na populacje wybranych gatunków z różnych podłoży geologicznych. Rośliny rosły w kulturach wodnych. Długość dnia w komorze klimatycznej wynosiła 18 godzin z temperaturą 24°C, a nocy 6 godzin z temperaturą 14°C. Testowano reakcję dwóch gatunków murawowych: przytulii właściwej oraz wilczomlecza sosnki. Materiałem wyjściowym w przypadku *Galium verum* były wyselekcjonowane siewki, równej długości, uzyskane po wysianiu nasion na miesiąc przed założeniem doświadczenia. Nasiona umieszczano w jałowym podłożu (mieszanka piasku oraz substratu torfowego do produkcji ogrodniczej) i hodowano w warunkach laboratoryjnych. Do podlewania używano wody dejonizowanej.

Sadzonki *Euphorbia cyparissias* uzyskano w sposób wegetatywny. Pobrane uprzednio górne fragmenty pędów umieszczano w przepuszczalnym podłożu (skład j.w.). Dolne odcinki sadzonek wilczomlecza przed włożeniem do podłoża traktowano preparatem Podkorzeń B firmy Himal. Jest to preparat naturalny, który poprawia warunki rozwoju dla korzeni i nie zawiera hormonów roślinnych. Pędy wilczomlecza ukorzeniały się około

miesiąca. Do eksperymentu wybrano sadzonki najbardziej zbliżone do siebie pod względem długości pędu. Następnie przeznaczono po trzy populacje dla wilczomlecza i przytulii – dwie serpentynitowe i jedną granitową, które reprezentowane były przez dwa osobniki z każdej populacji. Doświadczenie założono w pięciu powtórzeniach. Wybrane rośliny umieszczano w otworach na macie piankowej, a następnie w pojemniku z pożywką. Mata unosiła się na powierzchni, zapewniając stały kontakt systemu korzeniowego z pożywką (Fot. 2).



Fot. 2. *Galium verum* w kulturach wodnych w komorze klimatycznej (Fot. A. Woś)

Rośliny hodowano na pożywce płynnej o różnej konfiguracji stosunku Mg/Ca oraz trzech poziomach stężeń niklu:  $0 \text{ mg Ni dm}^{-3}$ ,  $5.0 \text{ mg Ni dm}^{-3}$  i  $10.0 \text{ mg Ni dm}^{-3}$ . Zastosowano zmodyfikowaną pożywkę Hoaglanda (Hoagland i Arnon 1950). Zmiany dotyczyły makroskładników i były konieczne ze względu na otrzymanie pożądanego stosunku molarnego Mg/Ca. W wariancie A stosunek molarny Mg/Ca wynosił 1:1, w wariancie B wynosił 8:1 (tab. 2). Objętość pożywki w każdej doniczce wynosiła  $1 \text{ dm}^3$ . Pożywkę codziennie napowietrzano za pomocą elektrycznego spieniacza, a wymieniano co 5 dni.

Zawartości oraz formy mikroskładników w pożywce były następujące ( $\mu\text{mol dm}^{-3}$ ): Fe 90 – NaFeEDTA, B 46 –  $\text{H}_3\text{BO}_3$ , Mn 9 –  $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , Zn 0.76 –  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , Cu 0.32 –  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , Mo 0.52 –  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , Cl 100 oraz Na 100 – NaCl. Odczyn pożywki regulowano do pH 6.0, używając 0.1 M NaOH lub 0.1 M HCl. Używano odczynników bez zanieczyszczeń z indeksem „czda”. Przy wymianie pożywki mierzono długość najdłuższego pędu lub rozgałęzienia oraz długość najdłuższego korzenia.

Po zakończeniu doświadczeń pędy roślin myto w wodzie dejonizowanej, a następnie suszono w celu przygotowania do późniejszych analiz składu pierwiastkowego.

Tabela 2. Zawartość makroskładników w pożywce ( $\text{mmol dm}^{-3}$ )

Forma składnika	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	$\text{KNO}_3$	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Wariant A	1	5	3.5	0.5	0.5
Wariant B	1	5	-	0.5	4.0

#### 4.2.2 Badanie reakcji roślin pochodzących z różnych podłoży geologicznych na czynniki kompleksu serpentynitowego

W Stacji Badawczo-Dydaktycznej Roślin Warzywnych i Ozdobnych w Psarach, należącej do Katedry Ogrodnictwa Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, przeprowadzono doświadczenie szklarniowe. Do eksperymentu wybrano po trzy populacje (dwie serpentynitowe i jedną granitową) wilczomleczka sosnki oraz przytulii właściwej. Przy wyborze gatunków kierowano się wynikami wstępnych eksperymentów, których celem było ustalenie możliwości uzyskania odpowiedniej liczby wyrównanych pędów wegetatywnych w warunkach utrzymywania i namnażania roślin *ex situ*. Rośliny hodowano na glebach serpentynitowej oraz granitowej.



Fot. 3. Doświadczenie szklarniowe z przytulią właściwą uprawianą na glebach serpentynitowej i granitowej (Fot. A. Woś)

Gleba serpentynitowa została pobrana z obrzeża płatu silnie zdegradowanej murawy kserotermicznej w Masywie Grochowej koło wsi Braszowice. Glebę wytworzoną z granitów pobrano z nieużytków sąsiadujących z kamieniołomu tych skał w Sobótce. Właściwości fizyko-chemiczne użytych w doświadczeniu gleb przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Właściwości fizyko-chemiczne gleb serpentynitowej (S) oraz granitowej (G) wykorzystanych w doświadczeniu wazonowym. Podano formy wymienne pierwiastków (ekstrakcja z użyciem 1M HCl)

	pH	Mg/Ca	Ni	Cr	Co	Cu	Zn	Mn	Fe	Mg	Ca	K	P
	H <sub>2</sub> O	mol/mol	mg kg <sup>-1</sup>										
G	4.9	0.2	2.5	0.6	1.5	6.8	37.5	190.3	1167.6	139.8	1134.5	65.1	18.3
S	7.8	1.3	118.4	10.2	15.2	7.0	16.8	395.6	3292.4	1075.0	1342.5	84.2	4.3

Doświadczenie prowadzono w doniczkach plastikowych bez otworów. Doniczki wypełniano glebą o objętości 1.5 dm<sup>3</sup>, a następnie sadzono po pięć siewek przytulii do każdej doniczki lub po jednej sadzonce wilczomlecza sosnki. Materiał wyjściowy uzyskano w analogiczny sposób jak w przypadku wcześniejszego doświadczenia (opis w rozdziale 4.2.1). Każdą z trzech populacji obu gatunków wysadzono w osobnych doniczkach na glebie serpentynitowej oraz granitowej, w pięciu powtórzeniach. Częstość podlewania była uzależniona od warunków atmosferycznych. Podczas doświadczenia mierzono długość najdłuższego pędu roślin, u wilczomlecza co 15 dni, u przytulii co 10 dni. Doświadczenie z przytulią właściwą i wilczomleczem sosnką trwało, odpowiednio, 64 i 78 dni. Po zakończeniu eksperymentu część nadziemną roślin wraz z systemem korzeniowym starannie oddzielano od gleby, ostrożnie wypłukując wodą. Dalszy etap przygotowywania materiału do analiz składu pierwiastkowego przebiegał w warunkach laboratoryjnych (por. rozdz. 4.3.1).

## 4.3 Prace laboratoryjne

Wszystkie prace przygotowawcze oraz analizy materiału roślinnego i glebowego wykonano w laboratorium Katedry Botaniki i Ekologii Roślin Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu.

### 4.3.1 Badania roślin

#### 4.3.1.1 Oznaczenia gatunków problematycznych

Gatunki problematyczne pod względem diagnozy taksonomicznej, m.in. z rodzaju *Festuca*, oznaczane były w toku prac kameralnych. W opisie gatunków zastosowano dwie agregacje: *Festuca ovina* agg. oraz *Festuca valesiaca* agg. *Festuca ovina* agg. obejmowała *F. airoides* Lam., *F. guestphalica* Boenn. ex Rchb., *F. ovina* L., natomiast *Festuca valesiaca* agg. grupowała *F. pseudovina* Hack. ex Wiesb., *F. rupicola* Heuff., *F. trachyphylla* (Hack.) Krajina oraz *F. valesiaca* Schleich. ex Gaudin (Alegro i Šoštarić 2006, Arndt 2008). Badania przedstawicieli rodzaju *Festuca* oparto o analizy przekrojów anatomicznych liści.

#### 4.3.1.2 Przygotowanie materiału roślinnego do analiz chemicznych

Przygotowanie materiału roślinnego do analiz chemicznych polegało na jego starannym oczyszczeniu, kilkukrotnym przepłukaniu wodą kranową, a następnie wodą dejonizowaną. Materiał suszono w suszarce z wymuszonym obiegiem powietrza w temperaturze 85°C do osiągnięcia stałej masy, następnie rozdrabniano go w młynku udarowym i mineralizowano w mieszaninie stężonych kwasów azotowego oraz nadchlorowego w stosunku objętościowym 4:1. Mineralizację przeprowadzano w bloku aluminiowym do uzyskania klarownego i bezbarwnego roztworu.

Pobraną biomasę z powierzchni badawczych rozdzielono na dwie frakcje – z warstwy zielnej i mszysto-porostowej, następnie suszono i ważono.

### 4.3.2 Przygotowanie gleb do analiz

Próby gleb doprowadzono do stanu powietrznie suchego w temperaturze pokojowej, następnie rozdrabniano w moździerzku oraz przesiewano przez sito o średnicy oczek 2 mm. W przypadku przygotowania prób gleb do oznaczania azotu całkowitego oraz zawartości metali zbliżonych do całkowitych (Mg, Ca, K, Ni, Cr, Co, Cu, Zn, Mn oraz Fe) rozdrabniano je w młynku agatowym.

W celu oznaczenia całkowitej zawartości azotu zastosowano zmodyfikowaną metodę Kjeldahla. Glebę mineralizowano w 15 cm<sup>3</sup> mieszaniny kwasów siarkowego oraz salicylowo-siarkowego w stosunku objętościowym 2:1. Mineralizowano 1 g gleby z dodatkiem 0.2 g mieszaniny selenowej oraz 2 g tiosiarczan sodu w temperaturze 340° C. Próby destylowano za pomocą aparatu Parnasa-Wagnera (Karczewska i Kabała 2008).

Do oznaczenia rozpuszczalnych form fosforu wykorzystano metodę Olsena. Ekstrahowano 5 g gleby w 100 ml 0.5 M roztworu wodorowęglanu sodu o pH 8.5 (Allen 1989), wytrząsając glebę przez 30 minut na mieszadle obrotowym (45 obr. min<sup>-1</sup>).

Wymienne formy wapnia, magnezu, potasu oznaczano po ekstrakcji 5 g gleby w 100 ml 1 M octanu amonu o pH 7.0. Roztwór wytrząsano przez godzinę na mieszadle obrotowym (45 obr. min<sup>-1</sup>) (Allen 1989).

Zawartości wymiennych form niklu, chromu, kobaltu, miedzi, cynku, manganu i żelaza oznaczano wykorzystując ekstrakcję gleby 1 M HCl. Do 5 g gleby dodawano 50 ml HCl, a następnie wytrząsano na mieszadle obrotowym (40 obr. min<sup>-1</sup>) przez godzinę. Ilość pierwiastków w ekstraktach uznano za potencjalnie przyswajalnie dla roślin (Karczewska i Kabała 2008). W wypadku niklu przeprowadzono również ekstrakcję z użyciem roztworu DTPA. Po dwugodzinnej ekstrakcji (40 obr min<sup>-1</sup>) 10 g gleby w 20 cm<sup>3</sup> roztworu DTPA z 0.1 M TEA (trietanoloamina) oraz 0.01 M CaCl<sub>2</sub> przy pH 7.3 (Quevauviller i in. 1996).

Zawartości metali w glebach zbliżone do całkowitych (Mg, Ca, K, Ni, Cr, Co, Cu, Zn oraz Fe) oznaczano po mineralizacji 0.5 g gleby w 10 cm<sup>3</sup> wody królewskiej. Mineralizację prowadzono w temperaturze 180° C do uzyskania klarownego roztworu (Karczewska i Kabała 2008).

### **4.3.3 Pomiary i oznaczenia**

Kwasowość czynną prób glebowych (pH w H<sub>2</sub>O) oznaczano metodą potencjometryczną. Zawiesinę dla prób glebowych sporządzono w stosunku gleby do wody 1:2.5 (m:V). Pomiar odczynu zawiesiny wykonywano w następnym dniu po przygotowaniu.

Maksymalną (MPW) i kapilarną (KPW) pojemność wodną oraz gęstość objętościową rzeczywistą ( $\gamma_{orz}$ ) oznaczono metodą wagową za pomocą cylinderków Kopeckiego o objętości 100 cm<sup>3</sup>. W tym celu wykorzystano kuwetę umożliwiającą podsiąk kapilarny (przy oznaczaniu KPW i  $\gamma_{orz}$ ) lub całkowite nasycenie wodą (przy oznaczaniu MPW). Cylinderki suszono w temperaturze 100° C do osiągnięcia stałej wagi (Drozd i in. 2002).



W celu określenia przybliżonej zawartości materii organicznej wyżarzano 2 g gleby w porcelanowych tygielkach w piecu muflowym w temperaturze 500° C przez 6 godzin, a następnie po wystudzeniu ważono na wadze laboratoryjnej z dokładnością do miligrama.

Zawartość fosforu po przesączeniu roztworu ekstrakcyjnego oznaczano metodą kolorymetryczną, wykorzystując spektrofotometr Helios Gamma.

W próbach roślinnych i glebach oznaczano zawartości magnezu, niklu, chromu, kobaltu, manganu, miedzi, cynku oraz żelaza metodą płomieniowej absorpcji atomowej (ASA) na spektrometrze Varian Spectraa 200. Tym samym aparatem, ale pracującym w trybie pomiaru emisji, oznaczano również potas i wapń. Do roztworów przy oznaczaniu wapnia i magnezu dodawano chlorek lantanu (Allen1989). Wykorzystano roztwory wzorcowe firmy Merck.

## 4.4 Analiza danych

### 4.4.1 Obliczenia wskaźników użytych w analizie danych

Charakterystykę termiczną powierzchni badawczych określono w sposób pośredni w oparciu o parametry rzeźby terenu. Na podstawie zmierzonych podczas prac terenowych wystaw i nachyleń stoków, obliczono potencjalny ładunek ciepła dla badanych obiektów, zgodnie z wzorem zaproponowanym przez McCune'a i Keon'a (2002, uzupełnienie McCune 2007):

$$rlc = 0.339 + 0.808 \times \cos(L) \times \cos(S) - 0.196 \times \sin(L) \times \sin(S) - 0.482 \times \cos(A) \times \sin(S)$$

gdzie:

rlc – potencjalny roczny ładunek ciepła ( $\text{MJ cm}^{-2} \text{ rok}^{-1}$ ), A – wystawa „zawinięta” względem osi NS wyrażona w radianach, S – nachylenie wyrażone w radianach, L – szerokość geograficzna.

Zdjęcia fitosocjologiczne wykonane na powierzchniach badawczych posłużyły do obliczenia wskaźników różnorodności ( $H'$ ) oraz równocенności ( $J'$ ) Shannona-Wienera według wzorów:

$$H' = -\sum_{i=1}^S (p_i \times \ln p_i) \quad p_i = \frac{n_i}{N_i} \quad \text{oraz} \quad J' = \frac{H'}{\ln S}$$

gdzie:

S – liczba gatunków w próbie,  $p_i$  – udział gatunków w próbie,  $n_i$  – liczba osobników wybranego gatunku,  $N_i$  – liczba wszystkich osobników wszystkich gatunków

Badane wskaźniki określają różnorodność gatunkową (H') oraz proporcjonalny stopień wyrównania udziału poszczególnych gatunków w zbiorowisku (J'). Do obliczeń wykorzystano pakiet MVSP (Kovach Computing Services 2004).

W celu określenia ilości pobranego składnika (Mg, Ca, Ni, Cr, Co) przez rośliny ze stanowisk serpentynitowych obliczono współczynnik koncentracji (WK). Stanowił iloraz zawartości danego pierwiastka w nadziemnych częściach roślin do ilości jego form wymiennych w glebie (Samecka-Cymerman i in. 2009). Nie obliczano WK na podstawie zawartości całkowitych, ze względu na wyjątkowo wysokie zawartości metali, aby nie pominąć lub umniejszyć zdolności pobierania ich z gleby przez rośliny (Stefanowicz i in. 2016). Wykorzystano następujący wzór:

$$WK = \frac{\text{zawartość metalu w roślinie}}{\text{zawartości wymienne metalu w glebie}}$$

W badaniach doświadczalnych prowadzonych *in vitro* obliczono indeks tolerancji (IT) roślin względem dwóch poziomów niklu przy zmiennych wartościach stosunku Mg/Ca w pożywce, wykorzystując wzór:

$$IT\% = \frac{\text{długość przyrostu korzenia w roztworze Ni}}{\text{długość przyrostu korzenia w kontroli}} \times 100\% \text{ (Karataglis 1986).}$$

Za kombinację kontrolną uznano wariant z równowagą molową Mg/Ca oraz bez dodatku niklu w pożywce.

#### 4.4.2 Analizy statystyczne

Analizy statystyczne z zakresu statystyk opisowych, analiz wariancji wykonano wykorzystując pakiet STATISTICA (StatSoft, Inc. 2014, v. 12.5). Normalność rozkładu danych analizowano testem W Shapiro-Wilka. Jednorodność wariancji sprawdzano testem Levene'a. W wypadku zmiennych negatywnie weryfikowanych tymi testami stosowano transformacje logarymiczne (ln, ln+1). W przypadku, gdy po transformacjach zmienne nie uzyskiwały normalności rozkładu wykorzystywano metody nieparametryczne – test Kruskala-Wallisa lub test U Manna-Whitneya. Analizy ze zmiennymi spełniającymi założenia metod parametrycznych prowadzono z użyciem testu t Studenta, jednoczynnikową analizą wariancji z testowaniem *post-hoc* istotności różnic: testem HSD Tukeya lub testem Tukeya dla różnych liczebności n.

W badaniach zróżnicowania kompozycji gatunkowej roślinności, czynników siedliskowych i składu pierwiastkowego roślin posłużono się metodami analiz wielowymiarowych (multivariate analysis). W celu eliminacji zmiennych kolinearnych oraz

oceny wpływu wielu zmiennych na zróżnicowanie siedlisk oraz składu chemicznego roślin wykorzystano analizę składowych głównych (Principal Component Analysis – PCA). Do analiz ordynacyjnych użyto pakietu Canoco wersja 5.0 (ter Braak i Šmilauer 2012). Zastosowano nietendycyjną analizę zgodności (DCA – Detrended Correspondence Analysis), aby rozpoznać strukturę danych. Na podstawie długości gradientu reprezentowanego przez pierwszą oś kanoniczną DCA ( $> 4SD$ ) ustalono unimodalny charakter danych dotyczących roślinności badanych muraw. Pozwoliło to wybrać metodę bezpośredniej kanonicznej analizy zgodności (CCA), której celem było określenie wpływu zmiennych siedliskowych na zróżnicowanie gatunkowe badanych zbiorowisk roślinnych. Istotność wpływu zmiennych na kompozycję gatunkową roślinności badano testem permutacyjnym Monte Carlo z krokową selekcją zmiennych. Ordynację CCA uzupełniono o analizy gradientowe wpływu zmiennych specyficznych dla kompleksu serpentynitowego na gatunki muraw. Wykorzystano w tym celu metody uogólnionych modeli addytywnych GAM (Generalized Additive Models).

## 5. Wyniki

### 5.1 Opis właściwości siedlisk badanych zbiorowisk trawiastych

Powierzchnie badawcze zaszeregowano do 7 grup w ramach różnych jednostek fizjograficznych. Klasyfikacji dokonano na podstawie lokalizacji oraz właściwości topograficznych badanych powierzchni. Wyznaczenie jednostek pozwoliło na bardziej wnikliwą analizę właściwości siedliskowych badanych muraw niż tylko na podstawie podziału według podłoża skalnego.

#### 5.1.1 Analizy parametrów topograficznych oraz fizykochemicznych siedlisk

Właściwości siedlisk powierzchni badawczych, dotyczące parametrów topograficzno-fizycznych oraz chemicznych przedstawiono w tabelach 4–6. Selekcji danych dokonano na podstawie analizy składowych głównych. Obiekty związane z badanymi podłożami przypisano do jednostek fizjograficznych według Kondrackiego (2001). Powierzchnie z podłoży na granitach oraz na wapieniach zakwalifikowano do czterech jednostek, po dwie na dany typ podłoża, natomiast serpentynitowe zakwalifikowano do trzech jednostek. Podano średnie dla poszczególnych jednostek fizjograficznych, a także średnie ogólne obliczone dla badanych podłoży geologicznych.

W tabeli 4 zestawiono dane dotyczące badanych parametrów topograficznych i fizyko-chemicznych gleb. Nie podawano wartości nachylenia stoków i ich wystaw, lecz zamieszczono wartości ładunku ciepła, który jest obliczany na podstawie tych parametrów (por. rozdz. 4.4.1). Dane odnoszące się do materii organicznej, kapilarnej pojemności wodnej (KPWw) oraz gęstości objętościowej gleb poddano transformacji logarytmicznej, co umożliwiło zastosowanie jednoczynnikowej analizy wariancji. Pozostałe wyniki analizowano metodami nieparametrycznymi (por. rozdz. 4.4.2).

Badane obiekty usytuowane były na różnych wysokościach (tab. 4). Najwyżej położone powierzchnie wapienne, w Górach Kaczawskich, osiągały niemal 500 m n.p.m., najniżej zaś usytuowane były murawy serpentynitowe Kamiennego Grzbietu, których wysokość bezwzględna nie przekraczała 200 m n.p.m. Nie stwierdzono istotnych różnic pomiędzy średnimi ogólnymi dla powierzchni z odmiennych podłoży geologicznych, natomiast występowały one pomiędzy powierzchniami z różnych jednostek fizjograficznych. Obiekty z granitów cechowała większa miąższość gleb w stosunku do

pozostałych podłoży i osiągała maksymalnie 28 cm na obszarze Wzgórz Niemczańsko-Strzelińskich. Gleby powierzchni wapiennych oraz serpentynitowych były płytsze, odnotowano najniższą wartość minimalną – 7.8 cm dla powierzchni położnych na Kamiennym Grzbiecie. Gleby wytworzone na granitach i serpentynitach charakteryzowały się mniejszą gęstością i tym samym większą pojemnością wodną w stosunku do gleb wykształconych na wapieniach. Zawartość materii organicznej w podłożach obiektów serpentynitowych była wyższa niż w pozostałych przypadkach. Chociaż średnie zawartości materii organicznej były najniższe w glebach wapiennych na obszarze Górach Kaczawskich, to najniższą wartość, niespełna 2%, odnotowano na granitach w Gościęcicach (Wzgórze Niemczańsko-Strzelińskie). Odczyn gleby był czynnikiem wyraźnie różnicującym odmienne typy podłoży. Najwyższe wartości pH, związane niewątpliwie z wysokimi koncentracjami wapnia, stwierdzono na glebach wapiennych. Maksymalna wartość pH wynosiła 8.05 i dotyczyła powierzchni z Gór Kaczawskich. Gleby wykształcone na granitach odznaczały się najniższymi wartościami średnimi pH, z minimalną wartością pH=4.71.

Tabela 4. Właściwości siedlisk badanych obiektów z różnych podłoży geologicznych (G – granity, S – serpentyny, W – wapienie). Podano średnie  $\pm$ SE. Średnie nieróżniące się istotnie przy  $p \leq 0.05$  oznaczono tymi samymi literami: małe dotyczą różnic pomiędzy wszystkimi jednostkami fizjograficznymi, duże pomiędzy podłożami skalnymi

Jednostka fizjograficzna	Podłoże	Lb powierzchni	Wysokość hipsometryczna	Ładunek ciepła	Miąższość gleby	Gęstość <sub>obj</sub>	KPW <sub>w</sub>	Materia organiczna	pH
		n	m n.p.m.	MJcm <sup>-2</sup> rok <sup>-1</sup>	cm	g cm <sup>-3</sup>	%	%	w H <sub>2</sub> O
M.Ślęży	G	12	197 ab $\pm 2.4$	0.86 ab $\pm 0.01$	15 ab $\pm 2.0$	0.94 abc $\pm 0.07$	69.5 ab $\pm 6.4$	7.13 ab $\pm 1.00$	5.37 a $\pm 0.12$
Wzg.Niem.-Strz	G	12	215 ab $\pm 6.8$	0.75 a $\pm 0.05$	20 b $\pm 1.4$	0.88 ab $\pm 0.07$	75.5 b $\pm 7.9$	7.79 ab $\pm 1.42$	5.40 a $\pm 0.15$
<b>ŚREDNIA</b>	<b>G</b>	<b>24</b>	<b>206 A</b> $\pm 4.0$	<b>0.81 A</b> $\pm 0.03$	<b>18 B</b> $\pm 1.3$	<b>0.91 B</b> $\pm 0.05$	<b>72.5 B</b> $\pm 5.0$	<b>7.46 A</b> $\pm 0.85$	<b>5.39 A</b> $\pm 0.09$
M.Ślęży	S	12	271 bc $\pm 14.4$	0.86 ab $\pm 0.01$	14 ab $\pm 0.9$	0.70 a $\pm 0.04$	93.5 b $\pm 8.7$	14.92 c $\pm 1.21$	5.73 a $\pm 0.11$
Kam.Grzbiet	S	16	176 a $\pm 2.0$	0.83 ab $\pm 0.03$	13 a $\pm 0.7$	0.78 ab $\pm 0.03$	83.3 b $\pm 4.8$	10.21 abc $\pm 0.78$	5.98 a $\pm 0.12$
Szklary	S	4	330 bc $\pm 3.3$	0.88 ab $\pm 0.01$	10 a $\pm 0.6$	0.80 abc $\pm 0.15$	98.3 ab $\pm 25.4$	14.83 bc $\pm 3.71$	6.73 ab $\pm 0.16$
<b>ŚREDNIA</b>	<b>S</b>	<b>32</b>	<b>231 A</b> $\pm 11.6$	<b>0.85 A</b> $\pm 0.02$	<b>13 A</b> $\pm 0.53$	<b>0.75 A</b> $\pm 0.03$	<b>89.0 C</b> $\pm 4.9$	<b>12.55 B</b> $\pm 0.83$	<b>5.98 B</b> $\pm 0.09$
Chelm	W	11	246 bc $\pm 15.3$	0.84 a $\pm 0.01$	12 a $\pm 0.66$	0.97 bc $\pm 0.04$	58.8 ab $\pm 4.3$	7.93 ab $\pm 0.87$	7.40 b $\pm 0.07$
G. Kaczawskie	W	9	471 c $\pm 22.6$	0.90 b $\pm 0.01$	12 a $\pm 1.30$	1.26 c $\pm 0.05$	41.6 a $\pm 2.8$	5.59 a $\pm 0.55$	7.84 b $\pm 0.05$
<b>ŚREDNIA</b>	<b>W</b>	<b>20</b>	<b>347 B</b> $\pm 28.7$	<b>0.86 A</b> $\pm 0.01$	<b>12 A</b> $\pm 0.67$	<b>1.10 C</b> $\pm 0.05$	<b>51.1 A</b> $\pm 3.3$	<b>6.88 A</b> $\pm 0.59$	<b>7.60 C</b> $\pm 0.06$

W tabeli 5 przedstawiono zawartości całkowite pierwiastków gleb z różnych podłoży geologicznych oraz różnych jednostek fizjograficznych. Dane odnoszące się do zawartości żelaza, niklu, manganu oraz kobaltu poddano transformacji logarytmicznej ( $\ln$ ), dzięki czemu zostały spełnione warunki analizy wariancji. Do pozostałych danych, nieprzekształconych, zastosowano analizy nieparametryczne – test Kruskala-Wallisa.

Skład chemiczny gleb odzwierciedlał właściwości skał macierzystych, z których zostały wytworzone. Gleby serpentynitowe charakteryzowały się wyższymi zawartościami azotu, magnezu i żelaza, a także metali ciężkich: niklu, chromu, manganu, kobaltu i miedzi, w stosunku do pozostałych podłoży. Zawartości magnezu w podłożu, obok koncentracji wapnia, różnicowały wyraźnie badane typy podłoży. Najwyższe koncentracje magnezu odnotowano w glebach serpentynitowych, a szczególnie z obiektów Kamiennego Grzbietu i wynosiły one maksymalnie  $180.5 \text{ g Mg kg}^{-1}$ . Najmniej zasobne w magnez były gleby granitowe, zwłaszcza te z Masywu Ślęży. Wykazano również istotne zróżnicowanie zawartości tego pierwiastka w glebach z różnych jednostek fizjograficznych, niezależnie od typu podłoża geologicznego.

Najwyższe zawartości całkowite wapnia wykazano dla gleb wapiennych z maksymalną jego zawartością na poziomie  $345.2 \text{ g Ca kg}^{-1}$  na obiektach z Gór Kaczawskich. Średnie koncentracje wapnia z gleb wytworzonych na wapieniach przekraczały, odpowiednio, prawie osiemdziesięciokrotnie oraz ponad stu pięćdziesięciokrotnie średnie zawartości w glebach serpentynitowych oraz granitowych. Analizy materiału glebowego wykazały zróżnicowanie średnich zawartości wapnia w podłożach wykształconych na skale wapiennej. Wykazano prawie trzykrotnie niższe zawartości tego pierwiastka w glebach z obszaru Chełmu w stosunku do obiektów z Gór Kaczawskich.

Średnie całkowite zawartości potasu na glebach serpentynitowych były około czterokrotnie niższe w porównaniu z glebami powierzchni wyznaczonych na granitach i wapieniach. Zaobserwowano większe rozbieżności koncentracji tego pierwiastka pomiędzy jednostkami fizjograficznymi na podłożu granitowym niż w pozostałych przypadkach. Obiekty z Masywu Ślęży charakteryzowała ponad trzykrotnie niższa zawartość potasu w stosunku do tych położonych na obszarze Wzgórz Niemczańsko-Strzelińskich.

Gleby wykształcone z wapieni i granitów miały takie same zawartości całkowite żelaza, choć zauważono niewielkie rozbieżności pomiędzy jednostkami fizjograficznymi. Gleby wykształcone na serpentynitach przewyższały ponad dwukrotnie zawartości żelaza w porównaniu do pozostałych podłoży. Najwyższe maksymalne stężenie tego pierwiastka

(106.5 g Fe kg<sup>-1</sup>) odnotowano dla gleb serpentynitowych Kamiennego Grzbietu. Jak już wcześniej wspomniano, gleby serpentynitowe są glebami metalonośnymi w odniesieniu do niklu, chromu i kobaltu, co potwierdzają wyniki tej pracy. Średnia zawartość niklu w tych glebach przewyższała ponad stukrotnie zawartości w glebach wapiennych oraz granitowych, osiągając maksymalnie 8.7 g Ni kg<sup>-1</sup> na powierzchniach z Masywu Szklar. Podobne tendencje, jak w przypadku niklu, wykazały analizy gleb na zawartość chromu, jednak rozbieżności pomiędzy glebami z różnych podłoży geologicznych nie były aż tak duże. Na glebach wapiennych stwierdzono 16 razy niższą zawartość chromu, natomiast na granitowych tylko około dwukrotnie niższą w porównaniu do gleb serpentynitowych.

Zasobność gleb w mangan była zróżnicowana zarówno dla badanych podłoży jak i jednostek fizjograficznych. Gleby wapienne i granitowe odznaczały się takimi samymi zawartościami całkowitymi manganu. Najniższą wartość (183.7 mg Mn kg<sup>-1</sup>) odnotowano dla obiektów wapiennych położonych na Opolszczyźnie w obszarze Chełmu.

Stężenia kobaltu w glebach serpentynitowych były około dziesięciokrotnie wyższe niż w przypadku gleb wapiennych i granitowych. Najwyższymi średnimi koncentracjami tego pierwiastka charakteryzowały się obiekty ze Szklar, choć najwyższą wartość 203.4 mg Co kg<sup>-1</sup> odnotowano dla gleb serpentynitowych Masywu Ślęży.

Zawartość miedzi w glebach z różnych podłoży geologicznych była zróżnicowana. Gleby serpentynitowe odznaczały się wyższymi koncentracjami tego metalu, i przewyższały średnio o 22% gleby wapienne i o 58% gleby granitowe. Pomimo tego, że serpentynitowa skała macierzysta determinowała średnio wyższe stężenia miedzi, to jednak maksymalna wartość dla jej zawartości wystąpiła na obiekcie położonym w obszarze Gór Kaczawskich na podłożu wapiennym i wynosiła 61.7 mg Cu kg<sup>-1</sup>. Co więcej, analizy statystyczna średnich zawartości miedzi dla jednostek fizjograficznych wykazały bogatsze zróżnicowanie powierzchni, niż tylko te związane ze skałą macierzystą gleb. Minimalną wartość dla zawartości miedzi odnotowano dla powierzchni z granitów położonych na terenie Wzgórz Niemczańsko-Strzelińskich.

Nie stwierdzono wpływu podłoża geologicznego na zawartości cynku w glebie, choć stwierdzono istotne różnice przy porównaniu wartości średnich dla poszczególnych jednostek fizjograficznych. Najwyższe średnie zawartości cynku odnotowano na powierzchniach serpentynitowych w Szklarach oraz na obiektach wapiennych w Górach Kaczawskich, najniższe natomiast na granitach w Masywie Ślęży.



Tabela 5. Koncentracje całkowite pierwiastków w glebach powierzchni z różnych podłoży geologicznych (G – granity, S – serpentynity, W – wapienie). Podano średnie  $\pm$ SE. Średnie nieróżniące się istotnie przy  $p \leq 0.05$  oznaczono tymi samymi literami: małe dotyczą różnic pomiędzy wszystkimi jednostkami fizjograficznymi, duże pomiędzy podłożami skalnymi

Jednostka fizjograf.	Podł.	n	N	Mg	Ca	K	Fe	Ni	Cr	Mn	Co	Cu	Zn
			%	g kg <sup>-1</sup>				mg kg <sup>-1</sup>					
Masyw Ślęży	G	12	0.22ab $\pm 0.04$	2.61 a $\pm 0.16$	0.42 a $\pm 0.13$	1.89 abc $\pm 0.39$	15.62 a $\pm 1.22$	15.89 a $\pm 3.72$	26.22 a $\pm 7.11$	500.8 ab $\pm 52.1$	6.27 a $\pm 0.38$	11.55 a $\pm 0.92$	62.3 a $\pm 4.0$
Wzgórza Niem.-Strz.	G	12	0.24ab $\pm 0.05$	8.73 abc $\pm 2.67$	1.75 ab $\pm 0.52$	6.26 c $\pm 0.88$	30.50 cd $\pm 2.66$	32.27 b $\pm 5.52$	35.49 a $\pm 11.56$	502.7 ab $\pm 53.5$	11.52 ab $\pm 1.44$	17.92abc 2.85	120.5 ab $\pm 20.7$
ŚREDNIA	G	24	0.23 A $\pm 0.03$	5.67 A $\pm 1.46$	1.09 A $\pm 0.30$	4.07 B $\pm 0.66$	23.06A $\pm 2.11$	24.08 A $\pm 3.68$	30.86 A $\pm 6.71$	501.7 A $\pm 36.5$	8.89A $\pm 0.91$	14.73 A $\pm 1.61$	91.4 A $\pm 12.0$
Masyw Ślęży	S	12	0.38 b $\pm 0.03$	35.20 c $\pm 12.22$	2.40 bc $\pm 0.34$	0.86 b $\pm 0.10$	59.72 e $\pm 6.57$	2072.6 c $\pm 192.2$	772.84 b $\pm 55.68$	996.4 c $\pm 113.0$	91.67 c $\pm 14.42$	19.87 bc $\pm 1.01$	102.0 b $\pm 6.0$
Kamienny Grzbiet	S	16	0.28 b $\pm 0.03$	45.31 c $\pm 15.98$	2.06 ab $\pm 0.47$	0.88 b $\pm 0.09$	45.83 de $\pm 5.39$	2289.9 c $\pm 323.3$	742.17 b $\pm 97.65$	854.6 c $\pm 63.1$	82.30 c $\pm 9.45$	24.79 c $\pm 2.18$	66.0 a $\pm 3.1$
Szklary	S	4	0.39ab $\pm 0.14$	13.84 bc $\pm 2.49$	2.79abcd $\pm 0.26$	0.70 ab $\pm 0.09$	66.29 e $\pm 11.78$	3959.3 c $\pm 1599.9$	1096.92b $\pm 184.67$	1159.9 c $\pm 218.7$	119.70 bc $\pm 22.68$	27.79 bc $\pm 5.59$	210.2 b $\pm 57.1$
ŚREDNIA	S	32	0.33 B $\pm 0.03$	37.59 C $\pm 9.22$	2.28 B $\pm 0.27$	0.85 A $\pm 0.06$	53.60B $\pm 4.07$	2417.1 B $\pm 269.2$	798.02 B $\pm 59.59$	945.9 B $\pm 59.9$	90.49 B $\pm 7.75$	23.32 B $\pm 1.39$	97.5 A $\pm 10.7$
Chełm	W	11	0.21ab $\pm 0.03$	4.38 ab $\pm 0.72$	83.83 cd $\pm 29.80$	3.28 abc $\pm 1.07$	16.57 ab $\pm 1.36$	27.20 ab $\pm 4.87$	49.75 a $\pm 10.56$	396.5 a $\pm 70.1$	7.36 a $\pm 0.67$	13.06ab $\pm 1.68$	89.3 ab $\pm 13.0$
Góry Kaczawskie	W	9	0.08 a $\pm 0.02$	21.77 c $\pm 4.69$	239.50 d $\pm 26.32$	4.18 ac $\pm 1.12$	27.48 bc $\pm 3.81$	20.47 ab $\pm 3.84$	51.32 a $\pm 22.66$	652.8 bc $\pm 68.9$	10.37 ab $\pm 1.37$	26.26bc $\pm 4.81$	250.3 b $\pm 65.5$
ŚREDNIA	W	20	0.15 A $\pm 0.02$	12.21 B $\pm 2.87$	153.89C $\pm 26.53$	3.68 B $\pm 0.76$	21.48A $\pm 2.20$	24.17 A $\pm 3.20$	50.46 A $\pm 11.39$	511.9 A $\pm 56.4$	8.71 A $\pm 0.78$	19.00 A $\pm 2.73$	161.7 A $\pm 34.6$

Zawartości wymienne badanych pierwiastków w glebach z wszystkich obiektów badawczych podano w tabeli 6. Dane odnoszące się do koncentracji fosforu, potasu, niklu, manganu oraz kobaltu po przekształceniach logarytmicznych analizowano testem Tukeya dla różnych  $n$  po jednoczynnikowej analizie wariancji. W pozostałych przypadkach wykorzystano metody nieparametryczne – Test Kruskala-Wallisa.

Podłoże geologiczne niewątpliwie wpływało na cechy chemiczne gleb. Zaobserwowano pewne analogie do zawartości całkowitych badanych pierwiastków, jednak nie we wszystkich przypadkach. Gleby serpentynitowe charakteryzowały wyższe zawartości wymiennych form magnezu, żelaza, niklu, chromu, miedzi oraz kobaltu w porównaniu do pozostałych podłoży. Wapienie, z kolei, na tle granitów i serpentynitów wyróżniały się najwyższymi koncentracjami wapnia, zaś granity były najmniej zasobne w chrom.

Zawartość wymiennych form wapnia była najwyższa w glebach wapiennych i przewyższała około pięciokrotnie zawartości tego pierwiastka w glebach z podłoży granitowych oraz serpentynitowych. Stwierdzono istotne różnice zawartości wymiennych wapnia pomiędzy jednostkami fizjograficznymi dotyczącymi masywów wapiennych.

Gleby serpentynitowe charakteryzowała znacznie wyższa zawartość magnezu w porównaniu z pozostałymi podłożami skalnymi. Analizy gleb wapiennych wykazały prawie trzynastokrotnie niższe koncentracje magnezu, a na granitowych około ośmiokrotnie. Maksymalne zawartości wymiennych form tego pierwiastka odnotowano dla powierzchni ze Szklar, a wynosiło  $3.1 \text{ g Mg kg}^{-1}$ . Na powierzchniach wyznaczonych na serpentynitach stwierdzono typową dla tego rodzaju gleb znaczną przewagę zawartości wymiennych magnezu nad wapniem. Wartości stosunku  $\text{Mg/Ca}$  osiągały średnio 1.57, natomiast maksymalną wartość 3.86 odnotowano dla gleb Masywu Szklar. Najmniej zasobne w magnez były gleby z obszaru Chełmu, na których odnotowano najniższą wartość na poziomie  $36.7 \text{ mg Mg kg}^{-1}$ .

Stwierdzono niższe zawartości fosforu na glebach wapiennych w porównaniu do granitowych i serpentynitowych. Gleby z obszaru Chełmu zawierały średnio dwa razy więcej fosforu niż gleby Gór Kaczawskich. Najbardziej zasobne w fosfor okazały się gleby granitowe z obszaru Masywu Ślęży, na których najwyższe koncentracje tego pierwiastka osiągnęły  $100.0 \text{ mg P kg}^{-1}$ .

Nie stwierdzono różnic w zawartości potasu na glebach granitowych w porównaniu do pozostałych podłoży, natomiast serpentynity charakteryzowały się jego wyższym poziomem w stosunku do gleb wapiennych. Najwyższe stężenie potasu odnotowano w

próbie gleb z powierzchni Kamiennego Grzbietu ( $337.2 \text{ mg K kg}^{-1}$ ), choć najwyższe wartości średnie zanotowano dla obiektów ze Szklar. Jedyne różnice zawartości potasu w ramach odmiennych jednostek fizjograficznych odnotowano dla masywu Chełmu oraz Gór Kaczawskich na glebach wapiennych. Minimalne wartości tego pierwiastka na poziomie  $42.7 \text{ mg K kg}^{-1}$  odnotowano w glebach z Gór Kaczawskich.

Najbardziej ewidentną cechą charakterystyczną, wyróżniającą gleby serpentynitowe była wysoka koncentracja form rozpuszczalnych metali ciężkich, a zwłaszcza niklu. Średnie zawartości wymienne tego pierwiastka w glebach serpentynitowych były około stukrotnie wyższe niż w granitowych i wapiennych. Maksymalnie odnotowano  $743.3 \text{ mg Ni kg}^{-1}$  w glebach serpentynitowych z obszaru Szklar, natomiast najwyższa wartość na pozostałych podłożach, nieserpentynitowych, wynosiła  $10.3 \text{ mg Ni kg}^{-1}$  i wykazano ją w glebach granitowych Strzelina. Nie odnotowano różnic koncentracji niklu pomiędzy poszczególnymi jednostkami fizjograficznymi na wapieniach i graniach. Na serpentynitach zaś ujawniły się rozbieżności między glebami Kamiennego Grzbietu oraz Szklar, z których te pierwsze wykazywały istotnie mniej niklu.

Zawartości wymienne chromu różnicowały badane powierzchnie. Najwięcej tego pierwiastka stwierdzono w glebach serpentynitowych, najmniej natomiast w glebach granitowych. Najbardziej zasobne w chrom okazały się gleby Kamiennego Grzbietu, na których odnotowano maksymalną wartość  $11.1 \text{ mg Cr kg}^{-1}$ .

Nie wykazano różnic w stężeniu manganu w glebach wapiennych oraz serpentynitowych. Gleby granitowe, natomiast, cechowały niższe zawartości średnie tego składnika w porównaniu z pozostałymi badanymi glebami. Najniższą wartość minimalną odnotowano w glebach granitowych Wzgórz Niemczańsko-Strzelińskich i wynosiła ona  $47.6 \text{ mg Mn kg}^{-1}$ .

Zawartości kobaltu, podobnie jak niklu lub miedzi, były wyższe na glebach serpentynitowych. Na glebach wykształconych na granitach stężenie tego pierwiastka było 13 razy niższe, a na powierzchniach wapiennych około ośmiokrotnie niższe, porównując do serpentynitów. Zawartość kobaltu w glebach z powierzchni należących do różnych jednostek fizjograficznych nie różniły się istotnie za wyjątkiem Kamiennego Grzbietu oraz Szklar, analogicznie jak w przypadku niklu.

Analizy materiału glebowego nie wykazały różnic w zawartość miedzi w glebach granitowych oraz wapiennych, wykazały natomiast wyższe zawartości tego pierwiastka na glebach serpentynitowych. Maksymalną zawartość odnotowano jednak dla powierzchni

wapiennej z obszaru Chełmu i wynosiła ona  $14.3 \text{ mg Cu kg}^{-1}$ , co więcej, minimalną wartość  $0.11 \text{ mg Cu kg}^{-1}$  również stwierdzono dla powierzchni wapiennej należącej do jednostki Góry Kaczawskie.

Nie zauważono istotnego wpływu skały macierzystej gleb na średnią zawartość cynku w podłożu. Stwierdzono jedynie istotne różnice między zasobnością gleb z obiektów badawczych różnych jednostek fizjograficznych.

Gleby wykształcone na wapieniach, granitach i serpentynitach charakteryzowały się odmienną zasobnością w żelazo. Największą zawartość form wymiennych żelaza stwierdzono w glebach serpentynitowych, na których to odnotowano maksymalną zawartość tego pierwiastka  $4.1 \text{ g Fe kg}^{-1}$  na terenie Masywu Szklar, najniższą zaś na glebach wapiennych, w których żelazo występowało nawet w ilościach śladowych.

Tabela 6. Koncentracje wymienne pierwiastków w glebach powierzchni z różnych podłoży geologicznych (G – granity, S – serpentyny, W – wapienie). Podano średnie  $\pm$ SE. Średnie nieróżniące się istotnie przy  $p \leq 0.05$  oznaczono tymi samymi literami: małe dotyczą różnic pomiędzy wszystkimi jednostkami fizjograficznymi, duże pomiędzy podłożami skalnymi

Jednostka fizjograficzna	Podłoże	n	Mg	Ca	Mg/Ca	P	K	Fe
			g kg <sup>-1</sup>		mol/mol	mg kg <sup>-1</sup>		
M.Ślęży	G	12	0.14 a $\pm$ 0.02	1.20 a $\pm$ 0.17	0.20 ab $\pm$ 0.01	42.05 c $\pm$ 6.99	118.5 b $\pm$ 13.8	836.7 ab $\pm$ 99.1
Wzg. Niem.-Strz.	G	12	0.19 ab $\pm$ 0.03	1.33 a $\pm$ 0.21	0.23 abc $\pm$ 0.01	23.13 b $\pm$ 3.48	147.9 b $\pm$ 16.1	860.9 ab $\pm$ 118.8
ŚREDNIA	G	24	0.16 B $\pm$ 0.02	1.27 A $\pm$ 0.13	0.22 B $\pm$ 0.01	32.59 B $\pm$ 4.30	133.2 AB $\pm$ 10.8	848.8 B $\pm$ 75.7
M.Ślęży	S	12	1.44 c $\pm$ 0.18	1.34 a $\pm$ 0.07	1.78 d $\pm$ 0.22	24.60 bc $\pm$ 2.37	134.1 b $\pm$ 16.0	1995.6 c $\pm$ 129.5
Kam. Grzbiet	S	16	1.04 bc $\pm$ 0.06	1.32 a $\pm$ 0.08	1.36 cd $\pm$ 0.09	20.12 b $\pm$ 1.27	166.2 b $\pm$ 17.5	1353.1 bc $\pm$ 102.0
Szklary	S	4	2.07 c $\pm$ 0.34	2.34 ab $\pm$ 0.42	1.79 bd $\pm$ 0.69	14.90 ab $\pm$ 3.74	195.2 b $\pm$ 21.4	3382.3 c $\pm$ 301.2
ŚREDNIA	S	32	1.32 C $\pm$ 0.10	1.45 A $\pm$ 0.09	1.57 C $\pm$ 0.13	21.15 B $\pm$ 1.28	157.8 B $\pm$ 11.3	1847.7 C $\pm$ 139.8
Chełm	W	11	0.09 a $\pm$ 0.01	6.95 b $\pm$ 0.29	0.02 a $\pm$ 0.00	15.94 b $\pm$ 2.05	142.2 b $\pm$ 12.9	513.1 a $\pm$ 65.5
G. Kaczawskie	W	9	0.12 a $\pm$ 0.02	7.00 b $\pm$ 0.16	0.03 a $\pm$ 0.00	8.09 a $\pm$ 1.64	65.7 a $\pm$ 5.7	220.8 a $\pm$ 98.5
ŚREDNIA	W	20	0.10 A $\pm$ 0.01	6.97 B $\pm$ 0.17	0.02 A $\pm$ 0.00	12.41 A $\pm$ 1.59	107.8 A $\pm$ 11.4	381.6 A $\pm$ 64.8

Jednostka fizjograficzna	Podłoże	n	Ni	Cr	Mn	Co	Cu	Zn
			mg kg <sup>-1</sup>					
M.Śląży	G	12	1.25 a ± 0.13	0.49 a ± 0.05	217.2 ab ± 23.1	1.77 a ± 0.13	4.89 abc ± 0.53	26.02 a ± 2.42
Wzg. Niem.-Strz.	G	12	3.05 a ± 0.76	0.60 a ± 0.07	200.5 a ± 43.8	2.29 a ± 0.27	3.80 ab ± 0.68	66.99 ab ± 24.04
ŚREDNIA	G	24	2.15 B ± 0.42	0.54 A ± 0.04	208.8 A ± 24.3	2.03 A ± 0.16	4.35 A ± 0.44	46.50 A ± 12.56
M.Śląży	S	12	224.58 bc ± 51.35	3.93 bc ± 0.72	442.6 c ± 30.9	29.74 bc ± 5.53	7.78 c ± 0.44	60.55 b ± 8.72
Kam. Grzbiet	S	16	113.09 b ± 12.11	5.91 c ± 0.65	307.2 abc ± 30.8	18.06 b ± 1.56	7.62 c ± 0.59	24.07 a ± 2.22
Szkлары	S	4	494.58 c ± 94.71	5.90 bc ± 0.78	494.5 bc ± 91.7	47.15 c ± 9.28	8.91 bc ± 1.82	115.08 ab ± 39.35
ŚREDNIA	S	32	202.58 C ± 31.20	5.17 C ± 0.46	381.4 B ± 25.4	26.08 B ± 2.95	7.84 B ± 0.39	49.13 A ± 7.70
Chełm	W	11	2.23 a ± 0.35	1.61 abc ± 0.19	313.3 abc ± 60.1	3.51 a ± 0.42	3.77 ab ± 1.09	30.68 ab ± 5.91
G. Kaczawskie	W	9	1.32 a ± 0.62	1.40 ab ± 0.03	349.4 abc ± 47.0	2.30 a ± 0.52	1.91 a ± 1.09	60.32 ab ± 23.46
ŚREDNIA	W	20	1.82 A ± 0.35	1.51 B ± 0.11	329.5 B ± 38.5	3.00 A ± 0.35	2.93 A ± 0.78	44.00 A ± 11.22

### 5.1.2 Analizy wielozmienne parametrów siedliskowych

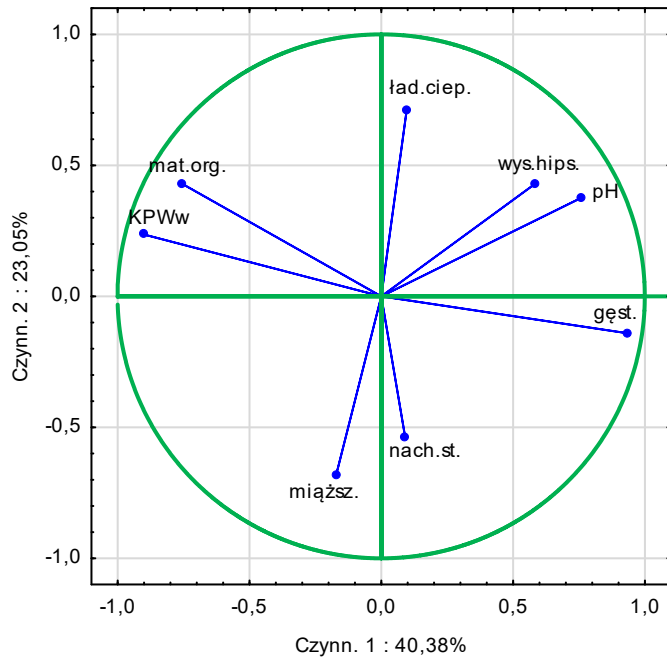
W celu analizy właściwości siedliskowych badane czynniki środowiskowe podzielono na 3 grupy: topograficzno-fizyczne, właściwości chemiczne gleb oraz zawartości całkowite pierwiastków w badanych glebach. W każdej analizie uwzględniono pH gleby.

Na podstawie analizy statystycznej zgromadzonych parametrów siedliskowych, topograficznych oraz fizykochemicznych badanych powierzchni wyeliminowano zmienne kolinearne. W tym celu wykorzystano analizę składowych głównych (PCA). W wyniku selekcji opartej na związku między poszczególnymi zmiennymi oraz z osiami PCA, a także zgodnie z kryterium Kaisera (Stanisz 2006) usunięto następujące dane: maksymalną pojemność wodną wyrażoną wagowo oraz objętościowo, kapilarną objętość wodną wyrażoną objętościowo oraz wystawę stoku.

Pierwsze trzy osie składowych głównych łącznie wyjaśniały 77% całkowitej zmienności. Najsilniej skorelowane z osią czynnika pierwszego były zmienne: gęstość objętościowa gleby oraz kapilarna pojemność wodna, zaś z drugą osią najbardziej powiązany był ładunek ciepła (tab. 7, rys. 2). Zmienne te również w największym stopniu określały ogólne zróżnicowanie badanych powierzchni.

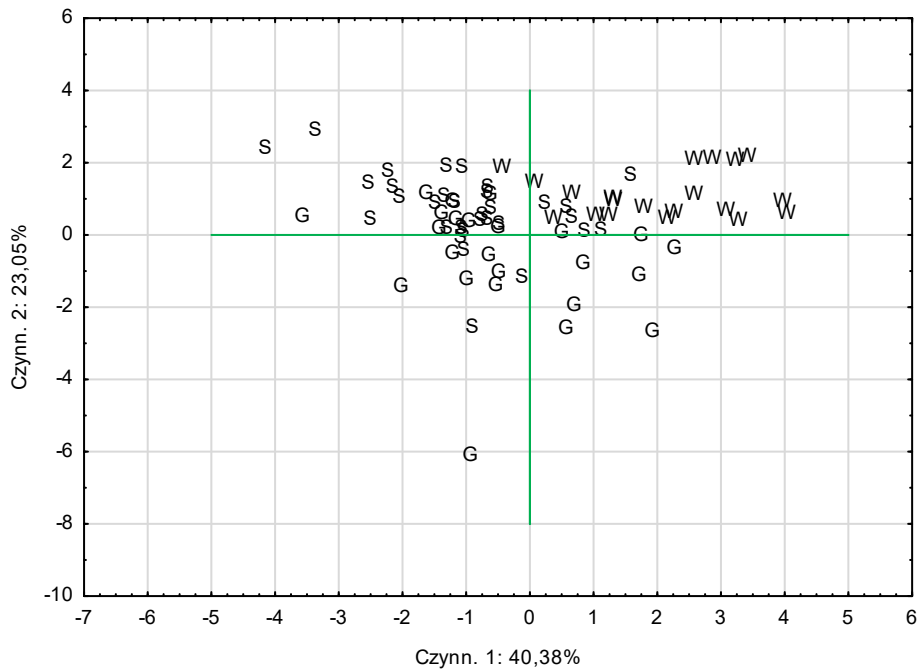
Tabela 7. Zestawienie wartości własnych wraz z procentowym udziałem w ogólnej wariancji składowych głównych oraz ładunków czynnikowych zmiennych dla PCA uwzględniającej parametry topograficzno-fizyczne powierzchni badawczych

PARAMETR	Czynnik 1 (PC1)	Czynnik 2 (PC2)	Czynnik 3 (PC3)
Wartości własne	3.23	1.84	1.11
% ogółu wariancji	40.38	23.05	13.92
ZMIENNE	Ładunki czynnikowe zmiennych		
Wysokość hipsometryczna	0.584	0.430	0.374
Nachylenie stoku	0.090	-0.536	0.705
Ładunek ciepła	0.096	0.712	-0.408
KPW <sub>wag</sub>	-0.905	0.237	0.167
Mięszość	-0.171	-0.679	-0.328
Gęstość objętościowa	0.935	-0.141	-0.114
Materia organiczna	-0.757	0.431	0.310
pH	0.759	0.376	0.256



Rys. 2. Wykres analizy składowych głównych (PCA) dla wybranych czynników topograficzno-fizycznych powierzchni badawczych

Rozmieszczenie powierzchni badawczych wzdłuż dwóch pierwszych osi czynników przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Projekcja wyników analizy składowych głównych (PCA) dla wybranych czynników topograficzno-fizycznych. Poszczególne litery przedstawiają uporządkowanie powierzchni badawczych z różnych podłoży geologicznych (G – granit, S – serpentynit, W – wapień) w przestrzeni dwóch pierwszych osi kanonicznych



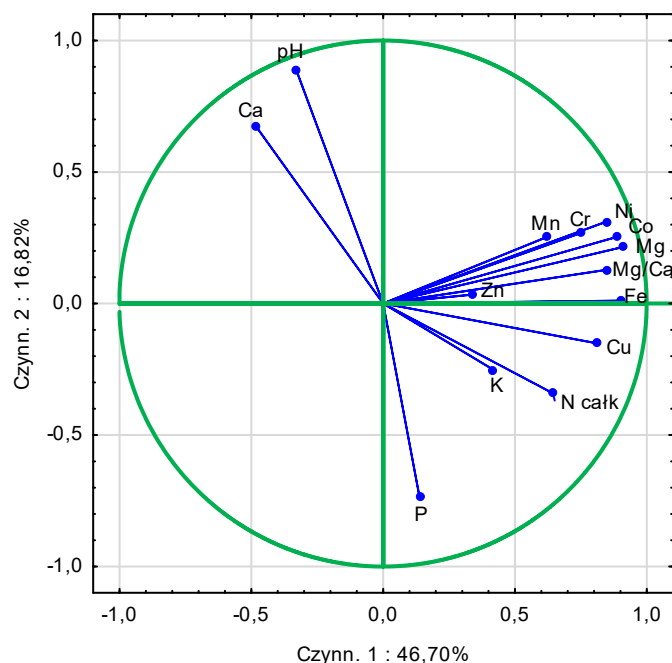
Powierzchnie z wapieni układały się wzdłuż wektorów wysokości hipsometrycznej oraz pH gleby. Powierzchnie badawcze z serpentynitów rozmieszczone były wzdłuż wektorów związanych z zawartością materii organicznej oraz kapilarną pojemnością gleby. Grupa badanych powierzchni z podłoża granitowych stanowiła najbardziej rozproszony zbiór punktów, nie wykazując zdecydowanych kierunkowych tendencji i przenikając się z chmurami punktów dla powierzchni z serpentynitów i wapieni.

W kolejnej analizie składowych głównych ordynacji poddano wyniki badań składu chemicznego gleb, obejmujące zawartości wymienne badanych pierwiastków włączając stosunek molarny Mg/Ca oraz formy całkowite azotu. Wyniki przedstawiono w tabeli 8 oraz na rysunkach 4–5.

Tabela 8. Zestawienie wartości własnych wraz z procentowym udziałem w ogólnej wariancji składowych głównych oraz ładunków czynnikowych zmiennych dla PCA uwzględniającej właściwości chemiczne gleb wszystkich powierzchni badawczych

PARAMETR	Czynnik 1 (PC1)	Czynnik 2 (PC2)	Czynnik 3 (PC3)
Wartości własne	6.54	2.35	1.70
% ogółu wariancji	46.70	16.82	12.13
ZMIENNE	Ładunki czynnikowe zmiennych		
pH	-0.330	0.888	-0.148
N <sub>całk.</sub>	0.644	-0.341	-0.494
Ni	0.848	0.312	0.216
Cr	0.747	0.267	0.174
Co	0.888	0.254	0.021
Cu	0.812	-0.151	-0.269
Zn	0.342	0.034	-0.665
Mn	0.619	0.252	-0.583
Fe	0.900	0.011	0.033
Mg	0.909	0.215	0.269
Ca	-0.485	0.678	-0.449
K	0.418	-0.251	-0.175
P	0.138	-0.737	-0.166
Mg/Ca	0.850	0.128	0.408

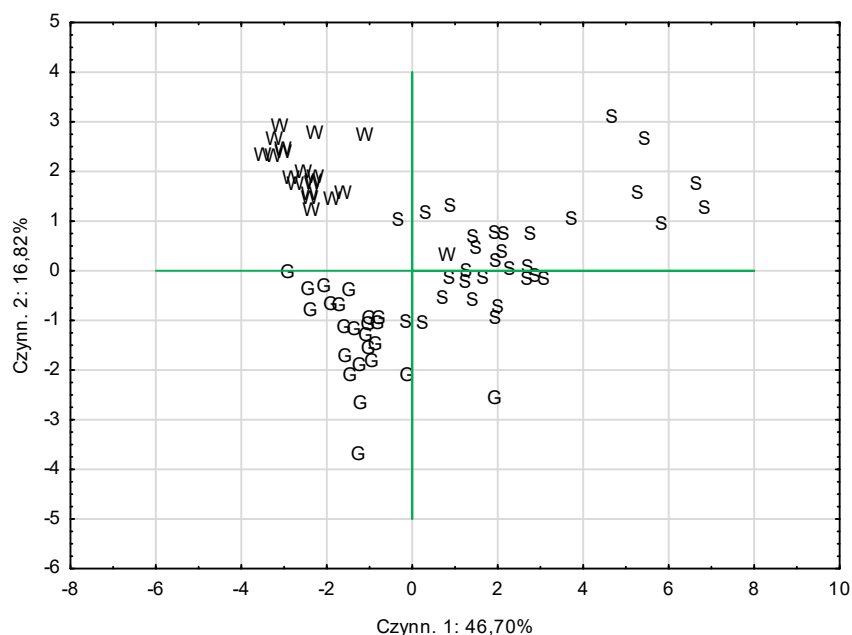
Pierwsze trzy składowe główne wyjaśniały około 76% całkowitej zmienności. Zawartości wymienne magnezu, żelaza, kobaltu oraz niklu jak również stosunek Mg/Ca w największym stopniu skorelowane były z osią czynnika pierwszego, natomiast z osią czynnika drugiego najsilniej skorelowana była wartość pH, zaraz po niej zawartości wymienne fosforu oraz wapnia.



Rys. 4. Wykres analizy PCA dla właściwości chemicznych gleb wszystkich powierzchni badawczych. Wymienione pierwiastki dotyczą zawartości wymiennych za wyjątkiem azotu

Punkty obrazujące powierzchnie badawcze z różnych podłoży geologicznych (rys. 5) separowały się w trzy niemal oddzielne zbiory. Ułożenie powierzchni z wapieni niewątpliwie determinowały zawartości wymienne Ca w glebach. Obiekty serpentynitowe były rozproszone wzdłuż osi czynnika pierwszego. Na ich układ wpływały zawartości metali, których wysokie koncentracje są typowe dla gleb wykształconych na serpentynitach.

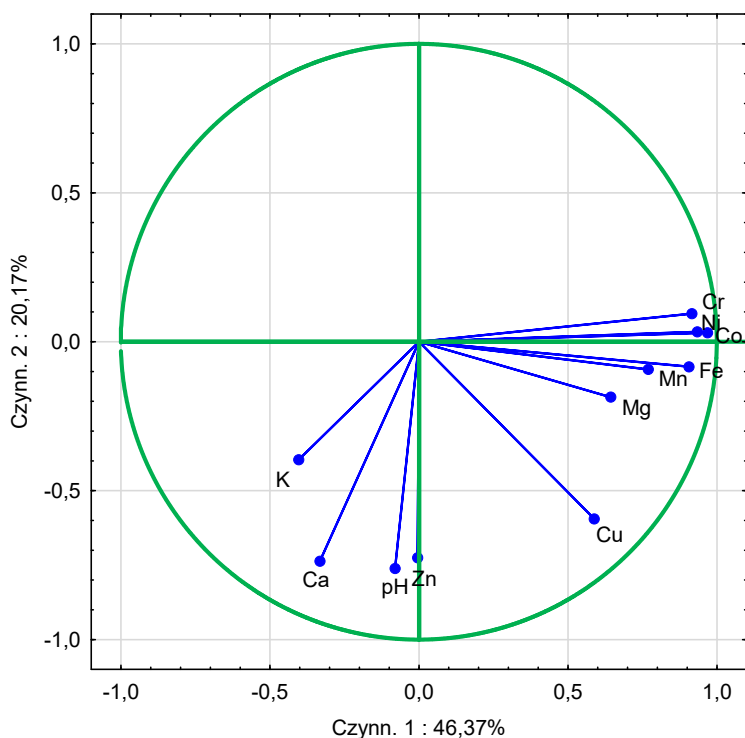
W celu ukazania zmienności badanych siedlisk pod względem zawartości całkowitych pierwiastków w glebie wykonano analizę PCA na podstawie macierzy korelacji. W analizie uwzględniono metale ciężkie oraz wapń, magnez i potas. W oparciu o kryterium Kaisera (Stanisz 2006) w analizie uwzględniono trzy składowe, które łącznie wyjaśniały 77% ogólnej zmienności (tab. 9).



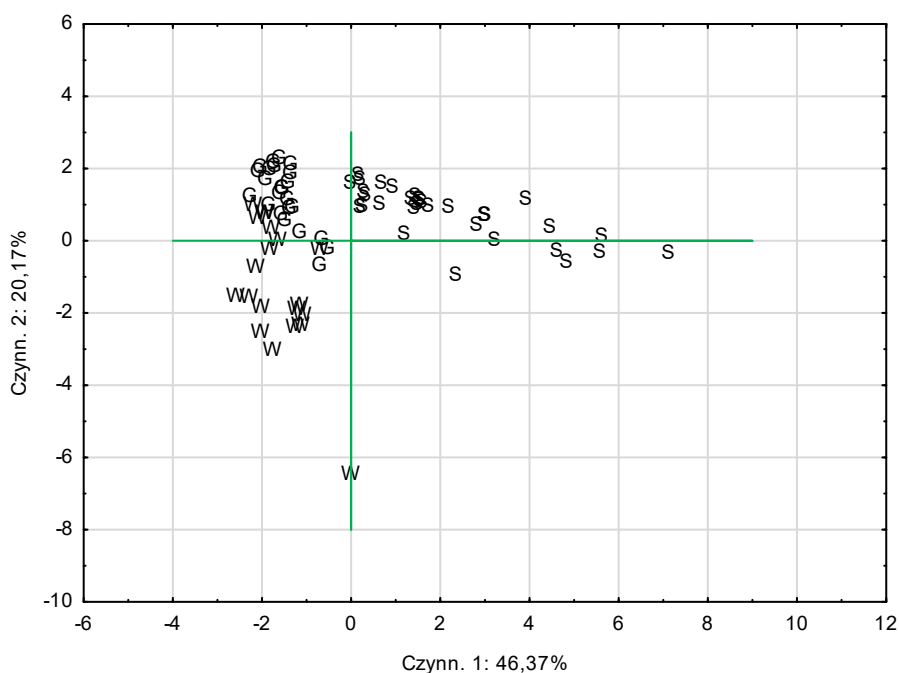
Rys. 5. Projektja wyników analizy PCA dla właściwości chemicznych gleb. Poszczególne litery przedstawiają uporządkowanie powierzchni badawczych z różnych podłoży geologicznych (G – granit, S – serpentynit, W – wapień) w przestrzeni dwóch pierwszych osi kanonicznych

Tabela 9. Zestawienie wartości własnych wraz z procentowym udziałem w ogólnej wariancji składowych głównych oraz ładunków czynnikowych zmiennych dla PCA uwzględniającej zawartości całkowite pierwiastków w glebach

PARAMETR	Czynnik 1 (PC1)	Czynnik 2 (PC2)	Czynnik 3 (PC3)
Wartości własne	5.10	2.22	1.16
% ogółu wariancji	46.37	20.17	10.52
ZMIENNE	Ładunki czynnikowe zmiennych		
pH	-0.080	0.761	-0.509
Ni	0.934	0.033	-0.131
Cr	0.916	0.095	-0.123
Co	0.968	0.030	-0.046
Cu	0.588	-0.595	0.326
Zn	-0.005	-0.725	0.402
Mn	0.769	-0.093	0.259
Fe	0.906	-0.084	0.121
Mg	0.643	-0.186	-0.292
Ca	-0.332	-0.736	-0.406
K	-0.404	-0.397	0.513



Rys. 6. Wykres analizy PCA dla zawartości całkowitych pierwiastków w glebach badanych powierzchni



Rys. 7. Projektja wyników analizy PCA dla zawartości całkowitych pierwiastków w glebach. Poszczególne litery przedstawiają uporządkowanie powierzchni badawczych z różnych podłoży geologicznych (G – granit, S – serpentyt, W – wapień) w przestrzeni dwóch pierwszych osi kanonicznych

Podobnie jak w przypadku zawartości wymiennych składników, w największym stopniu na ogólne zróżnicowanie powierzchni wpływały całkowite koncentracje pierwiastków specyficznych dla serpentynitów: kobaltu, niklu, chromu oraz żelaza (rys. 6). Jednocześnie były to czynniki najsilniej skorelowane z osią czynnika pierwszego, wzdłuż której, w przedziale dodatnich wartości układały się punkty powierzchni serpentynitowych, wyraźnie oddzielając się od powierzchni z granitów i wapieni (rys. 7). Te dwie grupy powierzchni wyraźnie separowały się wzdłuż osi drugiej, co związane jest z gradientami pH, wapnia i fosforu.

## **5.2 Opis roślinności badanych zbiorowisk murawowych**

### **5.2.1 Ogólna charakterystyka roślinności**

W tabeli 10 zamieszczono wyniki analiz roślinności dotyczące produkcji biomasy i parametrów różnorodności gatunkowej z obiektów badawczych. Wszystkie analizy przeprowadzono na nieprzekształconych danych zarówno dotyczących podłoża skalnych jak i jednostek fizjograficznych, ponieważ, nawet po transformacjach, dane nie uzyskiwały rozkładu normalnego lub nie spełniono założenia jednorodności wariancji. Średnie porównywano testem Kruskala-Wallisa. Szczegóły dotyczące wykonanych testów zamieszczono na końcu pracy (por. rozdz. 10.2).

Badane fitocenozy ciepłolubnych murawy wykształcone na odmiennych podłożach geologicznych nie wykazywały istotnego statystycznie zróżnicowania pod względem analizowanych parametrów, tj. wielkości biomasy roślin na powierzchniach badawczych, liczby gatunków oraz wskaźników różnorodności oraz równocześnie Shannona-Wienera (tab. 10). Stwierdzono jedynie rozbieżności w przypadku zwarcia warstwy zielonej pomiędzy obiektami na granitach i wapieniach, natomiast powierzchnie serpentynitowe nie różniły się od pozostałych. Zróżnicowanie pokrycia warstwy zielonej odnotowano również w ramach jednostek fizjograficznych, jednak zasadniczo wartości były do siebie zbliżone. Wykazano najniższy stopień pokrycia obiektów wapiennych z Gór Kaczawskich, na których minimalna wartość wynosiła tylko 19% pokrycia badanej powierzchni.

Ogólna produkcja biomasy na wszystkich trzech badanych rodzajach podłoży była zbliżona, nie stwierdzono istotnych różnic pomiędzy nimi. Istotne okazały się tylko różnice pomiędzy skrajnymi wartościami dla powierzchni z granitów Masywu Ślęży oraz wapieni Gór Kaczawskich. Jednak rozpatrując te grupy osobno stwierdzono znaczące rozbieżności między produkcją biomasy przez gatunki zielne na glebach granitowych i wapiennych. Biomasa roślin zielnych na powierzchniach z granitów była ponad dwukrotnie większa.

Najniższą wartość produkcji biomasy mchów i porostów odnotowano na powierzchniach z granitów, jednak istotnie różniła się ona tylko w porównaniu z powierzchniami na serpentynitach. Podobne wyniki uzyskano w wyniku analizy wielkości biomasy zielnych gatunków roślin naczyniowych, w tym przypadku również różnice istotne dotyczyły powierzchni na granitach z Masywu Ślęży oraz wapieni z Gór Kaczawskich, a także serpentynitów ze Szklar. Z porównania wartości średnich dla typów podłoży widać, że biomasa gatunków zarodnikowych kompensuje różnice w biomacie roślin zielnych sprowadzając w ten sposób ogólną biomasę do podobnych wielkości, nie różniących się statystycznie.

Liczebność gatunków na murawach w masywach granitowych, serpentynitowych oraz wapiennych nie różniła się istotnie między sobą. Stwierdzono średnio 14–16 gatunków na powierzchni 1 m<sup>2</sup> badanych muraw. Wykazano jedynie różnice liczebności pomiędzy powierzchniami należącymi do odmiennych jednostek fizjograficznych. Obiekty serpentynitowe Masywu Ślęży odznaczały się najniższą liczebnością gatunków, najwyższą zaś powierzchnie wapienne z obszaru Chełmu. Wyrównanie bogactwa gatunkowego muraw z wszystkich podłoży znalazło swoje odbicie w braku różnic dotyczących współczynników różnorodności ( $H'$ ) i równocенności ( $J'$ ) Shanona Wienera. Wartości współczynnika  $H'$  wskazują na średni poziom różnorodności gatunkowej wszystkich badanych muraw, natomiast współczynnik  $J'$  świadczy o wysokim wyrównaniu składu gatunkowego fitocenozy bez symptomów dominacji któregoś z gatunków.

Tabela 10. Właściwości roślinności badanych obiektów z różnych podłoży geologicznych (G – granity, S – serpentynity, W – wapienie). Podano średnie  $\pm$ SE. Średnie nieróżniące się istotnie przy  $p \leq 0.05$  oznaczono tymi samymi literami: małe dotyczą różnic pomiędzy wszystkimi jednostkami fizjograficznymi, duże pomiędzy podłożami skalnymi

Jednostka fizjograficzna	Podłoże	Lb powierzchni bad.	Zwarcie warstwy zielnej	Biomasa ogółem	Biomasa - naczyniowe	Biomasa - zarodnikowe	Liczba gatunków	Wskaźnik różnorodności H'	Wskaźnik równocенności J'
		n	%	g s.m. m <sup>-2</sup>			n m <sup>-2</sup>		
M.Ślęży	G	12	87.1 b $\pm$ 5.2	85.0 b $\pm$ 10.0	79.5 c $\pm$ 10.2	5.6 a $\pm$ 1.9	14.2 ab $\pm$ 0.7	1.74 a $\pm$ 0.09	0.66 a $\pm$ 0.03
Wzg.Niem.-Strz	G	12	86.6 b $\pm$ 3.1	66.2 ab $\pm$ 14.0	62.9 ac $\pm$ 14.5	3.4 a $\pm$ 1.8	13.6 ab $\pm$ 0.62	1.71 a $\pm$ 0.09	0.70 a $\pm$ 0.03
<b>ŚREDNIA</b>	<b>G</b>	<b>24</b>	<b>86.8 B</b> $\pm$ 2.9	<b>75.6 A</b> $\pm$ 8.6	<b>71.2 B</b> $\pm$ 8.9	<b>4.5 A</b> $\pm$ 1.3	<b>13.9 A</b> $\pm$ 0.5	<b>1.73 A</b> $\pm$ 0.06	<b>0.66 A</b> $\pm$ 0.02
M.Ślęży	S	12	75.6 ab $\pm$ 4.2	71.1 ab $\pm$ 15.5	58.3 abc $\pm$ 11.8	12.8 a $\pm$ 6.4	11.7 a $\pm$ 0.9	1.50 a $\pm$ 0.10	0.62 a $\pm$ 0.03
Kam.Grzbiet	S	16	86.9 b $\pm$ 3.6	68.8 ab $\pm$ 5.1	50.6 abc $\pm$ 3.6	18.3 a $\pm$ 4.8	15.9 ab $\pm$ 1.2	1.72 a $\pm$ 0.07	0.64 a $\pm$ 0.02
Szklary	S	4	67.3 ab $\pm$ 4.2	32.3 ab $\pm$ 15.3	15.4 ab $\pm$ 5.4	16.9 a $\pm$ 15.1	11.8 ab $\pm$ 1.7	1.66 a $\pm$ 0.16	0.68 a $\pm$ 0.05
<b>ŚREDNIA</b>	<b>S</b>	<b>32</b>	<b>80.2 AB</b> $\pm$ 2.7	<b>65.1 A</b> $\pm$ 6.8	<b>49.1 AB</b> $\pm$ 5.3	<b>16.0 B</b> $\pm$ 3.8	<b>13.8 A</b> $\pm$ 0.8	<b>1.63 A</b> $\pm$ 0.06	<b>0.63 A</b> $\pm$ 0.02
Chełm	W	11	80.7 b $\pm$ 3.8	58.0 ab $\pm$ 6.4	43.3 abc $\pm$ 7.1	14.7 a $\pm$ 4.8	16.8 b $\pm$ 0.8	1.77 a $\pm$ 0.10	0.63 a $\pm$ 0.03
G. Kaczawskie	W	9	38.1 a $\pm$ 6.0	36.9 a $\pm$ 10.5	18.9 b $\pm$ 4.0	18.0 a $\pm$ 9.1	14.8 ab $\pm$ 2.5	1.86 a $\pm$ 0.16	0.72 a $\pm$ 0.03
<b>ŚREDNIA</b>	<b>W</b>	<b>20</b>	<b>61.6 A</b> $\pm$ 10.3	<b>48.5 A</b> $\pm$ 6.2	<b>32.3 A</b> $\pm$ 5.0	<b>16.2 AB</b> $\pm$ 4.7	<b>15.9 A</b> $\pm$ 1.2	<b>1.81 A</b> $\pm$ 0.09	<b>0.67 A</b> $\pm$ 0.02

## 5.2.2 Analizy ordynacyjne składu gatunkowego muraw

Do badań dotyczących wpływu właściwości siedlisk na kompozycję gatunkową badanych muraw wykorzystano analizy ordynacyjne. Analizowanymi zmiennymi były dane dotyczące właściwości fizyko-chemicznych gleb oraz parametrów topograficznych pozyskane z 76 powierzchni badawczych, a także zestawienia składu gatunkowego roślinności z ilościowością wyrażoną w skali procentowej. W celu rozpoznania struktury danych przeprowadzono DCA, której wyniki przedstawiono w tabeli 11.

Tabela 11. Podsumowanie wyników nietendencyjnej analizy zgodności (DCA)

Osie	1	2	3	4	Całkowita zmienność występowania gatunków
Wartości własne	0.632	0.477	0.364	0.323	9.134
Wyjaśniana wariancja (% kumulująco)	6.91	12.13	16.12	19.65	
Długość gradientu	4.32	3.45	3.08	2.90	

Analizę przeprowadzono bez transformacji danych, z usuwaniem efektu łuku metodą segmentową. Pierwsza oś kanoniczna opisuje decydującą część zróżnicowania badanej roślinności. Jej wartość własna przekroczyła próg istotności analizy, który według Jongmana i in. (1987) wynosi 0.500.

Następnie wykonano analizę CCA (por. 4.4.2), w której wybrano opcję transformacji logarytmicznej danych dotyczących roślinności. W toku kolejnych przybliżeń dokonano eliminacji kolinearnych zmiennych siedliskowych, aby uzyskać wartość wskaźnika *inflation factor* na poziomie  $<20$ . Wyniki tej analizy przedstawiono w tabeli 12.

W kanonicznej analizie zgodności (CCA), po identyfikacji i eliminacji zmiennych kolinearnych, analizowano zmienność występowania gatunków na powierzchniach badawczych jako reakcję na zawartości wymiennych form pierwiastków w glebach (P, K, Mg, Ca, Ni, Cr, Co, Zn, Mn, Fe, Cu), ich odczynu, kapilarnej pojemności wodnej (KPWw) i miąższości, a także wysokości hipsometrycznej. W tabeli 13 podano wyniki selekcji i oceny istotności wpływu zmiennych na kompozycję gatunkową: rozpatrywanych indywidualnie (efekty marginalne) oraz łącznie (efekty warunkowe).



Tabela 12. Podsumowanie wyników kanonicznej analizy zgodności (CCA) dla zmiennych siedliskowych badanych powierzchni

Osie	1	2	3	4	Suma wartości własnych
Wartości własne	0.564	0.274	0.249	0.208	8.243
Korelacje gatunki- środowisko	0.976	0.918	0.891	0.855	
Skumulowany procent wariancji danych roślinności (response data i fitted response data)	6.8 23.4	10.2 34.8	13.2 45.1	15.7 53.8	

Tabela 13. Wyniki kanonicznej analizy zgodności (CCA) dotyczącej istotności zmiennych w odniesieniu do kompozycji gatunkowej muraw – efekty marginalne oraz efekty warunkowe. Wartości dla zmiennych o istotnym wpływie ( $p \leq 0.05$ ) zapisano pogrubioną czcionką

Zmienna	Wyjaśniana zmienność (%)	pseudo-F	P	Zmienna	Wyjaśniana zmienność (%)	pseudo-F	P
Efekty marginalne				Efekty warunkowe			
<b>Ca<sub>wym</sub></b>	<b>6.0</b>	<b>4.7</b>	<b>0.002</b>	<b>Ca<sub>wym</sub></b>	<b>6.0</b>	<b>4.7</b>	<b>0.002</b>
<b>pH</b>	<b>5.7</b>	<b>4.5</b>	<b>0.002</b>	<b>Wysokość</b>	<b>3.4</b>	<b>2.7</b>	<b>0.002</b>
<b>Wysokość</b>	<b>5.4</b>	<b>4.2</b>	<b>0.002</b>	<b>Mg<sub>wym</sub></b>	<b>2.5</b>	<b>2.1</b>	<b>0.002</b>
<b>Fe<sub>wym</sub></b>	<b>3.3</b>	<b>2.6</b>	<b>0.002</b>	<b>N<sub>całk</sub></b>	<b>1.9</b>	<b>1.6</b>	<b>0.006</b>
<b>KPW<sub>w</sub></b>	<b>3.1</b>	<b>2.4</b>	<b>0.002</b>	<b>Miąszość</b>	<b>1.8</b>	<b>1.5</b>	<b>0.008</b>
<b>Mg<sub>wym</sub></b>	<b>3.1</b>	<b>2.4</b>	<b>0.002</b>	<b>Ni<sub>wym</sub></b>	<b>1.7</b>	<b>1.5</b>	<b>0.028</b>
<b>Cu<sub>wym</sub></b>	<b>3.1</b>	<b>2.4</b>	<b>0.002</b>	<b>Mn<sub>wym</sub></b>	<b>1.7</b>	<b>1.4</b>	<b>0.026</b>
<b>N<sub>całk</sub></b>	<b>3.0</b>	<b>2.3</b>	<b>0.002</b>	pH	1.5	1.2	0.088
<b>Co<sub>wym</sub></b>	<b>2.9</b>	<b>2.2</b>	<b>0.002</b>	Fe <sub>wym</sub>	1.4	1.1	0.214
<b>P<sub>wym</sub></b>	<b>2.8</b>	<b>2.1</b>	<b>0.002</b>	Cr <sub>wym</sub>	1.3	1.1	0.286
<b>Cr<sub>wym</sub></b>	<b>2.6</b>	<b>2.0</b>	<b>0.002</b>	P <sub>wym</sub>	1.1	0.9	0.552
<b>Miąszość</b>	<b>2.5</b>	<b>1.9</b>	<b>0.002</b>	Zn <sub>wym</sub>	1.1	0.9	0.536

Zmienna	Wyjaśniana zmienność (%)	pseudo-F	P	Zmienna	Wyjaśniana zmienność (%)	pseudo-F	P
<b>Ni<sub>wym</sub></b>	<b>2.4</b>	<b>1.8</b>	<b>0.006</b>	Cu <sub>wym</sub>	1.0	0.9	0.732
<b>K<sub>wym</sub></b>	<b>2.1</b>	<b>1.6</b>	<b>0.008</b>	Co <sub>wym</sub>	1.0	0.8	0.786
<b>Mn<sub>wym</sub></b>	<b>2.1</b>	<b>1.6</b>	<b>0.004</b>	K <sub>wym</sub>	1.0	0.8	0.816
Zn <sub>wym</sub>	1.3	1.0	0.474	KPW <sub>w</sub>	0.9	0.7	0.920

Rozpatrując pojedynczo wszystkie zmienne siedliskowe stwierdzono, że największy wpływ na zróżnicowanie roślinności badanych powierzchni mają zawartości wymiennych form wapnia w glebie. Również odczyn gleby, związany niewątpliwie z zawartością wapnia (jednak nie wykazujący nadmiernej z nim kolinearności: inflation factor=10.7), wprowadzał stosunkowo duży procent zmienności. Trzecią zmienną siedliskową o największym wpływie na roślinność była wysokość hipsometryczna, wprowadzająca ponad 5% zmienności. Wszystkie zmienne analizowane oddzielnie miały istotny wpływ na różnorodność gatunkową badanych siedlisk, za wyjątkiem zawartości cynku w glebach.

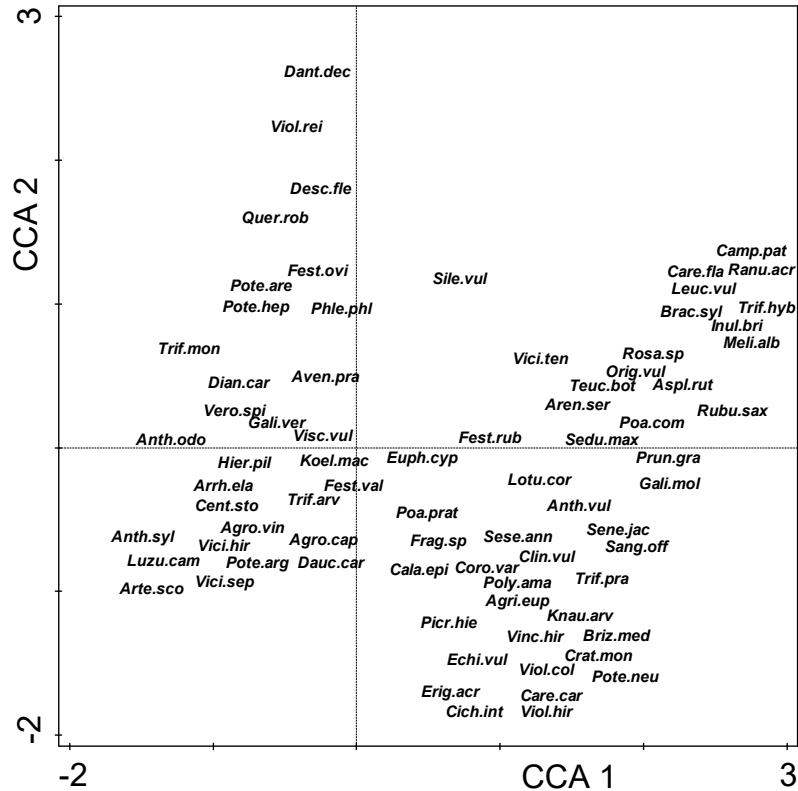
Analizując zmienne jako współdziałujące (efekty warunkowe – conditional effects) odnotowano istotne znaczenie jedynie w przypadku siedmiu czynników siedliskowych. Podobnie jak w przypadku zmiennych traktowanych oddzielnie (efekty marginalne – simple effects) wapń w najwyższym stopniu różnicował roślinność. Kolejną zmienną o największym wpływie była wysokość hipsometryczna oraz zawartości wymiennych form magnezu, niklu oraz manganu, a także azotu całkowitego. Daje się zatem zauważyć silny wpływ czynników specyficznych dla siedlisk serpentynitowych (Ca, Mg, Ni) i wapiennych (Ca). Z właściwości fizycznych gleb, to miąższość wpływała istotnie na różnicowanie badanych siedlisk, wprowadzając prawie 2% zmienności.

Dwie pierwsze osie kanoniczne wyjaśniały łącznie około 35% całkowitej zmienności (fitted response data), z czego pierwsza oś tłumaczyła ponad 23% (tab. 12). Z pierwszą osią najsilniej skorelowana była zawartość wapnia ( $r=0.87$ ) oraz pH gleby ( $r=0.85$ ), a także wysokość hipsometryczna ( $r=0.77$ ). Z drugą osią, natomiast, najmocniej powiązane były zawartości wymiennych form magnezu ( $r=0.68$ ), kobaltu ( $r=0.67$ ) oraz niklu ( $r=0.59$ ) (por. rys. 8).

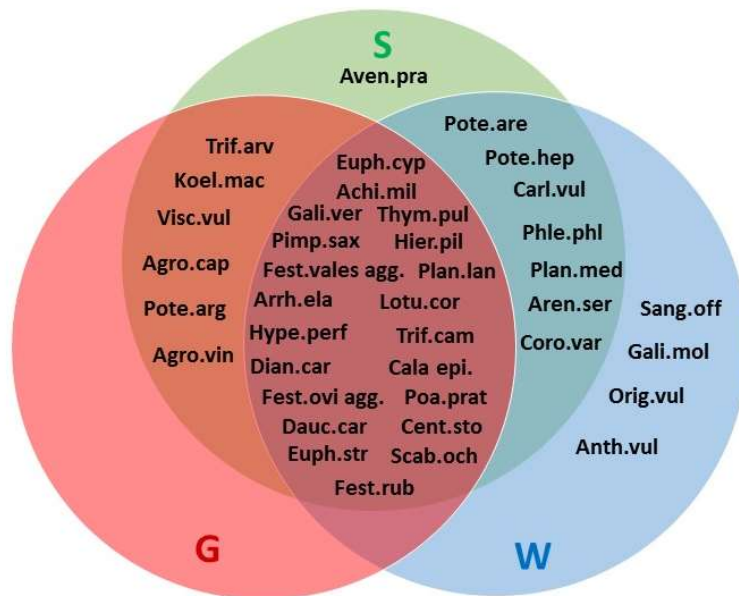


minimalnych wartości obu osi w dolnej lewej części wykresu. Stanowiska badawcze na podłożach serpentynitowych stanowią osobną grupę, rozciągniętą wzdłuż drugiej osi wykresu. Ich układ determinowały wektory gradientów zawartości w glebie magnezu oraz niklu, manganu i pozostałych metali ciężkich. Powierzchnie badawcze wykształcone na skałach wapiennych stanowią dość rozproszoną, choć odrębną grupę punktów. Podsumowując można stwierdzić, że spośród badanych podłoży najsilniej wyodrębniają się murawy nawapienne, o czym decyduje zasobność w wapń, związany z tym odczyn i wysokość hipsometryczna. Słabiej zróżnicowane względem siebie są murawy z granitów i serpentynitów. O różnicach pomiędzy nimi decydują skorelowane z drugą osią CCA czynniki specyficzne dla siedlisk serpentynitowych – wysokie koncentracje magnezu i niklu.

Na rysunku 9 przedstawiono wyniki kanonicznej analizy zmienności (CCA) z rozmieszczeniem gatunków powierzchni badawczych względem dwóch pierwszych osi kanonicznych. Skróty nazw gatunków widocznych na wykresie zamieszczono na końcu pracy (por. rozdz. 10.1). Wyselekcjonowane zostały gatunki o istotnym znaczeniu dla ordynacji. Ponadto w celu uzyskania czytelności wykresu usunięto cztery gatunki występujące sporadycznie. Gatunki o wysokich częstościach, wspólne dla wszystkich trzech rodzajów podłoży skalnych, koncentrują się w centralnej części diagramu z nieznacznymi przesunięciami w kierunku poszczególnych skupień powierzchni, widocznych na rysunku 8. Skrajne pozycje zajmują gatunki o stosunkowo niskiej częstości występowania związane z siedliskami o właściwościach odpowiadających wysokim wartościom gradientów, decydujących o zróżnicowaniu powierzchni. Wyraźnie wyodrębnia się grupa gatunków nawapiennych: *Arenaria serpyllifolia* L., *Sedum maximum* (L.) Hoffm., *Origanum vulgare* L., *Anthyllis vulneraria* L., *Sanguisorba officinalis* L., *Polygala amara* L., *Teucrium botrys* L., *Poa compressa* L., *Brachypodium sylvaticum* (Huds.) P. Beauv., *Festuca rubra* L. s. s. Do gatunków silnie związanych z siedliskami serpentynitowymi należą: *Potentilla arenaria* Borkh., *Potentilla heptaphylla* L., *Phleum phleoides* (L.) H. Karst., *Festuca ovina* agg., *Trifolium montanum*, *Avenula pratensis* (L.) Dumort., *Dianthus cartusianorum* L., *Galium verum* L.



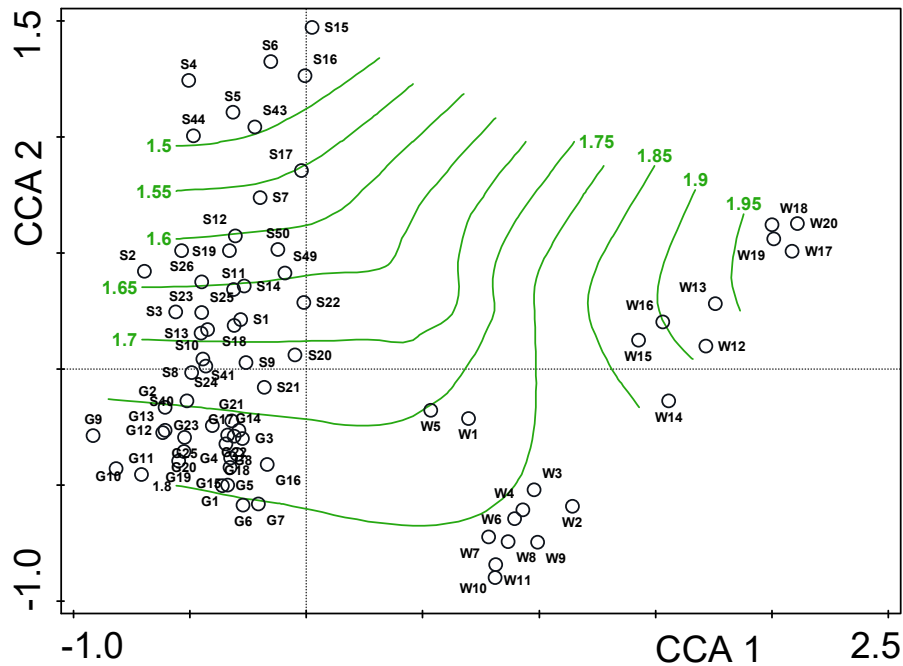
Rys. 9. Diagram kanonicznej analizy zgodności (CCA) gatunków występujących na ciepłolubnych murawach w przestrzeni dwóch pierwszych osi kanonicznych. Skróty nazw gatunków zamieszczono w załączniku 10.1



Rys. 10. Współwystępowanie gatunków na powierzchniach badawczych w obrębie siedlisk na granitach (G), serpentynitach (S) i wapieniach (W). Skróty nazw gatunków zamieszczono w załączniku 10.1

Analiza składu gatunkowego, dotycząca roślin występujących na minimum 11% spośród badanych powierzchni, wykazała, że dość liczną grupę stanowiły gatunki wspólne dla wszystkich podłoży (rys. 10). Nie odnotowano roślin specyficznych dla granitów, podczas gdy występowały takie na wapieniach (4 gatunki) i na serpentynitach (1 gatunek). Stosunkowo dużo gatunków wspólnych stwierdzono dla serpentynitów i wapieni, nieco mniej dla serpentynitów i granitów badanych muraw.

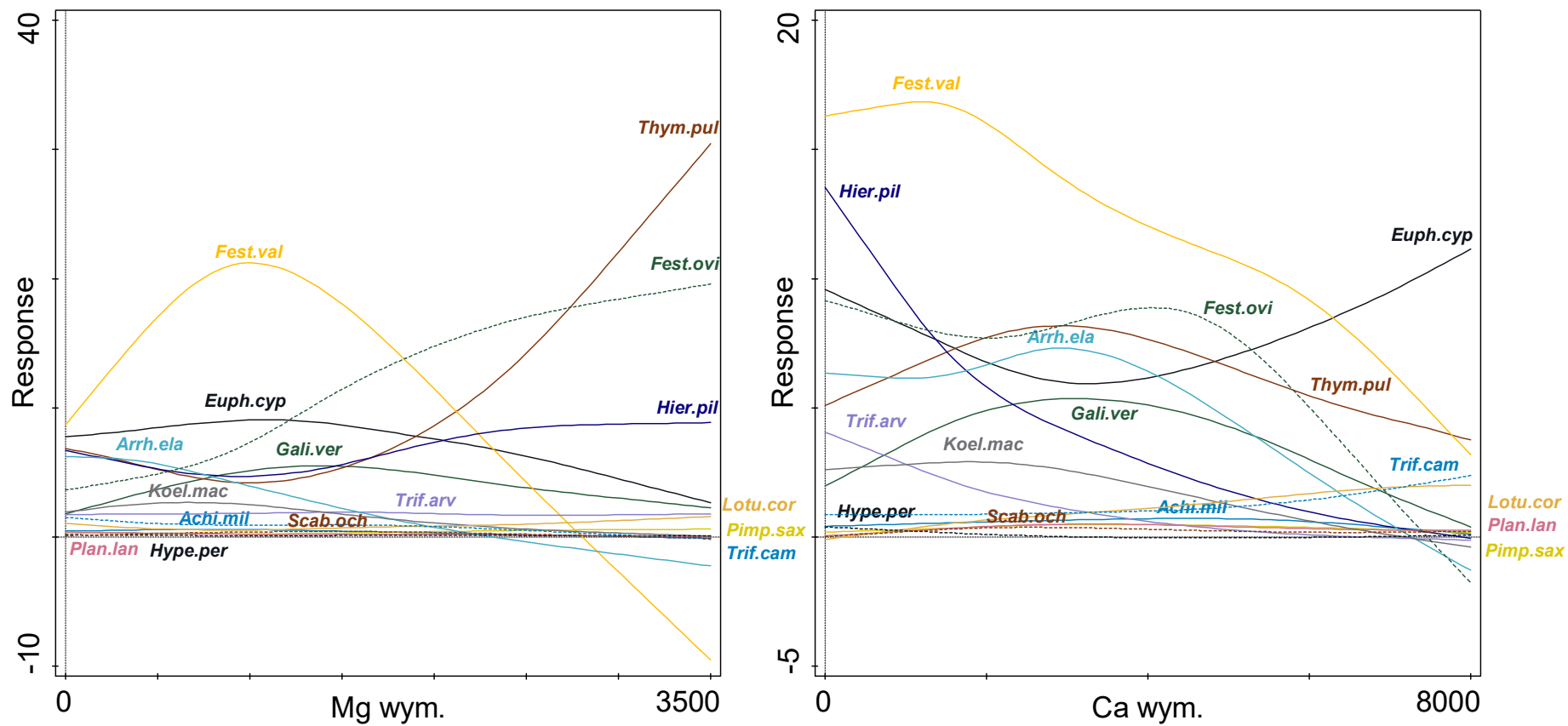
Na rysunku 11 przedstawiono rozmieszczenie powierzchni badawczych na tle izolinii, wyznaczających wartość wskaźnika różnorodności gatunkowej Shannona-Wienera. Mimo braku istotnych różnic średnich wartości współczynnika Shannona-Wienera pomiędzy obiektami przedstawionymi w tabeli 10 izolinie tego wskaźnika wskazują czytelne zróżnicowanie w przestrzeni ordynacyjnej CCA. Wartości współczynników Shannona-Wienera obniżają się od powierzchni na wapieniach zgodnie z malejącymi wartościami pierwszej osi CCA, a następnie od siedlisk granitowych po serpentynitowe zgodnie z rosnącymi wartościami drugiej osi. Najwyższą wartością współczynnika  $H'$  odznaczały się powierzchnie nawapienne z Gór Kaczawskich (W12–W20), nieco niższe wartości odnotowano również dla siedlisk na wapieniach z rejonu Chełmu (W1–W11), a także dla powierzchni z granitów. Wykazano najniższą różnorodność gatunkową na murawach serpentynitowych, zwłaszcza na Wzgórzach Oleszeńskich w Przemilowie oraz na niektórych powierzchniach w rejonie Gogołowa na Wzgórzach Kiełczyńskich oraz w Szklarach, co na podstawie ordynacji powierzchni (rys. 8) koresponduje z wysokimi zawartościami magnezu, niklu i pozostałych metali ciężkich w glebach. Zatem przynajmniej w części wydaje się związane z czynnikami kompleksu serpentynitowego.



Rys. 11. Diagram kanonicznej analizy zgodności (CCA) z izoliniami odpowiadającymi wartościom współczynnika Shannona-Wienera ( $H'$ ) dla roślinności powierzchniowej badawczych w przestrzeni dwóch pierwszych osi CCA

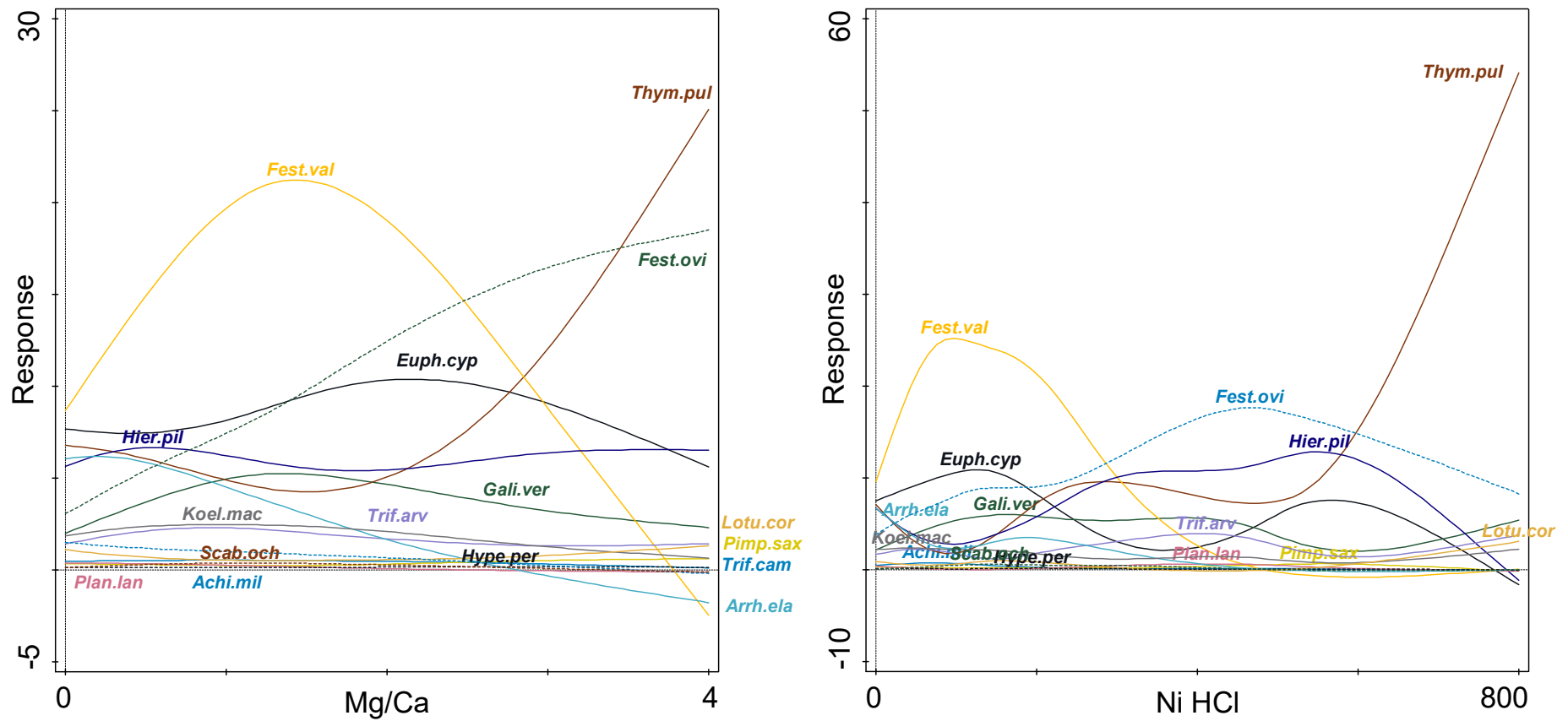
Na rysunkach 12–14 oraz w tabeli 14 przedstawiono wyniki analizy reakcji gatunków na wybrane zmienne siedliskowe z wykorzystaniem metody GAM (Generalized Additive Models). Do analiz gradientowych wybrano zmienne współtworzące kompleks serpentynitowy: zawartości magnezu i wapnia, wartości stosunku tych pierwiastków oraz zawartości niklu. Badano reakcje gatunków występujących na wszystkich podłożach skalnych z częstością powyżej 20%. Stosunek form wymiennych Mg/Ca został wyeliminowany z wcześniejszych analiz CCA w celu uniknięcia kolinearności z danymi dotyczącymi zawartości tych pierwiastków w glebie. Zbadano również reakcje gatunków względem pierwszych dwóch osi CCA.

Do gatunków najczęściej wykazujących istotne statystycznie reakcje na gradienty analizowanych czynników należą: *Galium verum*, *Thymus pulegioides* i *Festuca valesiaca*. Zwraca uwagę silna dodatnia reakcja *T. pulegioides* zarówno na wysokie zawartości magnezu i wynikające z tego wartości stosunku Mg/Ca, jak i wysokie koncentracje niklu wymiennego. Należy nadmienić, że bardzo podobne charakterystyki reakcji *T. pulegioides* uzyskano również w wypadku koncentracji form niklu ekstrahowanych octanem amonu i DTPA, a także zawartości całkowitych tego pierwiastka. Wyników tych nie przedstawiono w pracy.

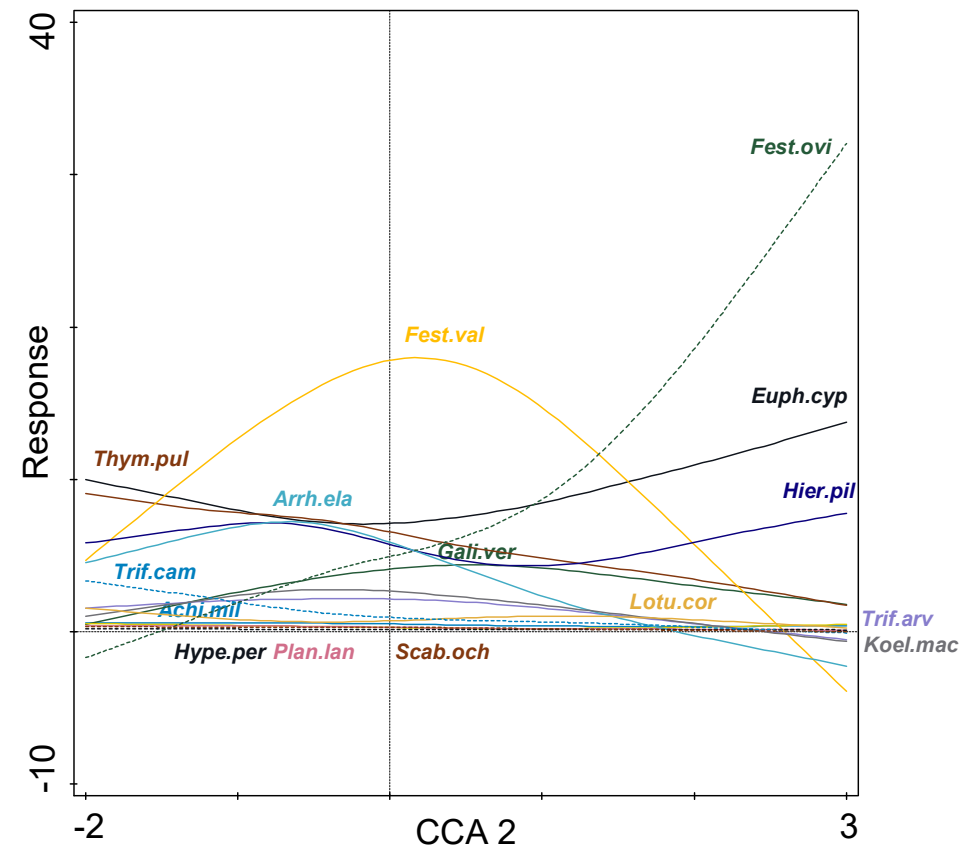
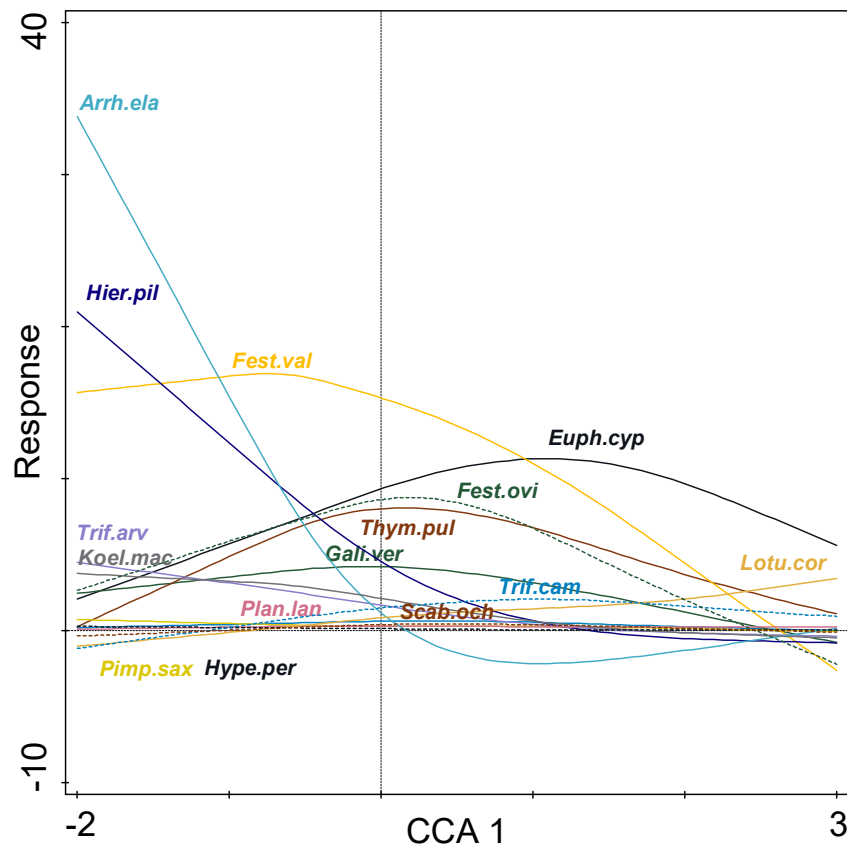


Rys. 12. Krzywe reakcji gatunków względem koncentracji wymiennego magnezu oraz wapnia w glebach





Rys. 13. Krzywe reakcji gatunków względem gradientu stosunku koncentracji wymiennego magnezu do wapnia w glebach oraz koncentracji wymiennego niklu



Rys. 14. Krzywe reakcji gatunków względem pierwszej i drugiej osi CCA

Tabela 14. Podsumowanie kanonicznej analizy zgodności (CCA) z wykorzystaniem metody GAM dla reakcji gatunków w stosunku do wybranych zmiennych siedliskowych i pierwszych dwóch osi CCA; pogrubiono wartości istotne ( $p \leq 0.05$ ). Rozwinięcie skrótów nazw gatunków zestawiono w załączniku 10.1

Zmienna Gatunek	Ca			Mg			Mg/Ca			Ni			CCA1			CCA2		
	R <sup>2</sup> [%]	F	p	R <sup>2</sup> [%]	F	p	R <sup>2</sup> [%]	F	p	R <sup>2</sup> [%]	F	p	R <sup>2</sup> [%]	F	p	R <sup>2</sup> [%]	F	p
Euph.cyp	3.7	1.4	0.253	2.0	0.7	0.517	<b>13.9</b>	<b>3.4</b>	<b>0.018</b>	10.8	1.4	0.228	<b>8.1</b>	<b>3.2</b>	<b>0.045</b>	5.6	2.2	0.120
Achi.mil	2.3	0.8	0.567	1.6	0.6	0.565	1.3	0.3	0.872	5.8	0.7	0.645	3.2	1.2	0.311	1.2	0.5	0.634
Gali.ver	<b>13.8</b>	<b>5.8</b>	<b>0.004</b>	<b>15.2</b>	<b>6.5</b>	<b>0.002</b>	<b>22.0</b>	<b>5.9</b>	<b>0.001</b>	<b>19.9</b>	<b>2.9</b>	<b>0.015</b>	<b>10.6</b>	<b>4.3</b>	<b>0.017</b>	<b>8.0</b>	<b>3.2</b>	<b>0.048</b>
Thym.pul	1.8	0.7	0.507	<b>10.2</b>	<b>4.1</b>	<b>0.002</b>	<b>17.6</b>	<b>4.5</b>	<b>0.004</b>	<b>22.8</b>	<b>3.4</b>	<b>0.005</b>	4.3	1.6	0.203	2.5	0.9	0.607
Pimp.sax	1.3	0.5	0.618	1.2	0.4	0.648	4.1	0.9	0.542	2.7	0.3	0.921	3.2	1.2	0.307	2.2	0.8	0.550
Fest.val	7.0	2.8	0.070	<b>14.7</b>	<b>6.3</b>	<b>0.003</b>	<b>15.0</b>	<b>3.7</b>	<b>0.012</b>	<b>22.9</b>	<b>3.4</b>	<b>0.005</b>	<b>8.1</b>	<b>3.2</b>	<b>0.047</b>	<b>11.0</b>	<b>4.5</b>	<b>0.014</b>
Hier.pil	<b>11.5</b>	<b>4.7</b>	<b>0.012</b>	1.7	0.6	0.526	10.1	2.3	0.073	6.6	0.8	0.564	<b>14.2</b>	<b>6.0</b>	<b>0.004</b>	4.2	1.6	0.208
Trif.arv	<b>9.5</b>	<b>3.8</b>	<b>0.026</b>	0.2	0.1	0.922	7.8	1.8	0.153	10.3	1.3	0.255	<b>7.8</b>	<b>3.1</b>	<b>0.052</b>	3.0	1.1	0.329
Plan.lan	3.1	1.2	0.322	1.8	0.7	0.514	4.3	0.9	0.566	6.1	0.8	0.609	0.8	0.3	0.745	1.8	0.7	0.515
Arrh.ela	5.4	2.1	0.134	2.5	1.0	0.609	7.3	1.6	0.180	4.0	0.5	0.817	<b>24.7</b>	<b>12.0</b>	<b>0.000</b>	6.6	2.6	0.082
Koel.mac	7.3	2.9	0.063	2.7	1.0	0.370	4.7	1.0	0.395	1.8	0.2	0.970	<b>7.7</b>	<b>3.1</b>	<b>0.053</b>	5.1	2.0	0.146
Lotu.cor	<b>12.2</b>	<b>5.1</b>	<b>0.009</b>	2.5	0.9	0.603	8.7	2.0	0.114	7.4	0.9	0.511	<b>20.0</b>	<b>9.1</b>	<b>0.000</b>	6.5	2.5	0.086
Hype.per	7.2	2.8	0.066	0.9	0.3	0.732	5.2	1.2	0.334	4.9	0.6	0.732	2.5	0.9	0.604	0.6	0.2	0.801
Fest.ovi	4.9	1.9	0.161	6.0	2.3	0.106	6.8	1.5	0.210	6.2	0.8	0.596	3.7	1.4	0.254	<b>17.2</b>	<b>7.6</b>	<b>0.001</b>
Scab.och	2.6	1.0	0.620	3.1	1.2	0.321	5.8	1.3	0.282	9.7	1.2	0.295	4.8	1.8	0.165	1.3	0.5	0.612

### 5.2.3 Charakterystyka reakcji gatunków na właściwości gleb

Dalsza część pracy dotyczy wyselekcjonowanych gatunków muraw na podstawie wcześniej uzyskanych wyników zawartych w tej pracy. Kryterium wyboru stanowiło występowanie gatunku na każdym z badanych typów podłoża oraz swoista reakcja na właściwości podłoża, wykazana m.in. w analizie gradientowej (por. rozdz. 5.2.2).

#### 5.2.3.1 Wpływ właściwości siedlisk na pobieranie makro- i mikroelementów oraz metali ciężkich

W tabeli 15 przedstawiono wyniki analiz składu pierwiastkowego badanych gatunków roślin. Dane poddano transformacjom logarytmicznym w celu uzyskania rozkładu normalnego i/lub jednorodności wariancji. W przypadku, gdy nadal nie spełniały założeń analizy wariancji, zastosowano metody nieparametryczne. Szczegóły dotyczące testów statystycznych znajdują się w załączniku do pracy (por. rozdz. 10.3).

Najwyższą zdolność do gromadzenia niklu w nadziemnych częściach roślin zaobserwowano u wilczomlecza sosnki, u którego osobniki ze stanowisk serpentynitowych kumulowały nawet do 254 mg Ni kg<sup>-1</sup> s.m., natomiast wartości średnie przewyższały ponad dziesięciokrotnie stężenia u roślin rosnących na granitach oraz niemal osiemdziesięciokrotnie u osobników ze stanowisk na wapieniach (tab. 15). Populacje wilczomlecza sosnki z granitów zawierały mniej potasu, a także wykazywały najmniejsze zawartości chromu oraz cynku w porównaniu do roślin tego gatunku z pozostałych podłoży. Zawartość manganu w tkankach roślin z podłoży serpentynitowych i wapiennych nie różniła się istotnie, natomiast rośliny populacji z granitów kumulowały około trzykrotnie więcej tego pierwiastka. Nie odnotowano różnic w akumulacji miedzi i żelaza przez wilczomlecza sosnkę, z odmiennych podłoży geologicznych.

Przytulia właściwa z podłoży granitowych na tle innych badanych gatunków wyróżniała się wysoką zawartością cynku oraz manganu. Maksymalna koncentracja cynku u tego gatunku osiągnęła 412 mg Zn kg<sup>-1</sup> s.m., podczas gdy zawartość manganu wynosiła 361 mg Mn kg<sup>-1</sup> s.m. i była zbliżona do wartości uzyskanej przez dziurawiec zwyczajny (315 mg Mn kg<sup>-1</sup> s.m.). Materiał roślinny *Galium verum* pobrany z podłoży serpentynitowych odznaczał się najmniejszymi zawartościami wapnia oraz potasu w porównaniu do pozostałych podłoży, natomiast zawartość niklu przewyższała trzynastokrotnie rośliny z podłoży na wapieniach oraz prawie czterdziestokrotnie z

granitów. Populacje z masywów granitowych, wapiennych oraz serpentynitowych *Galium verum* nie różniły się między sobą pod względem akumulacji chromu, kobaltu oraz żelaza.

W próbach dziurawca zwyczajnego *Hypericum perforatum*, rosnącego na glebach wytworzonych z wapieni, stwierdzono około trzykrotnie niższe zawartości wapnia w porównaniu do pozostałych gatunków. Populacje serpentynitowe kumulowały istotnie więcej magnezu niż te z wapieni oraz granitów, ponadto odnotowano u nich najwyższe zawartości niklu, średnio jedenaście i trzydzieści cztery razy większe niż w populacjach, odpowiednio: z granitów i wapieni. Nie stwierdzono różnic w ilości pobranego potasu, chromu, kobaltu, miedzi oraz żelaza przez ten gatunek rosnący na różnych podłożach. *H. perforatum* z granitów przewyższał stężeniem cynku pozostałe badane populacje.

U *Scabiosa ochroleuca*, podobnie jak u pozostałych gatunków, zaobserwowano wyższe stężenia niklu w materiale pobranym z gleb serpentynitowych w porównaniu do populacji z podłoży wapiennych. Jedynie w przypadku tego gatunku średnie zawartości niklu w roślinach z gleb granitowych nie różniły się statystycznie od tych z gleb serpentynitowych. Wyniki analiz wykazały również brak istotnych różnic w pobieraniu chromu, kobaltu i żelaza przez driakiew żółtą bez względu na rodzaj skały macierzystej podłoża.

Macierzanka zwyczajna odznaczała się większą zdolnością do kumulacji żelaza w porównaniu do pozostałych gatunków. Choć nie odnotowano istotnych różnic pomiędzy próbkami z różnych podłoży geologicznych, to wykazano wyższe wartości średnie dla powierzchni granitowych, na których maksymalna zawartość wyniosła  $2.81 \text{ g Fe kg}^{-1} \text{ s.m.}$  Osobniki z granitów odznaczały się wyższymi koncentracjami manganu i cynku w porównaniu do pozostałych podłoży. Stwierdzono wyższe zawartości magnezu oraz niklu w materiale roślinnym *Thymus pulegioides*, należącym do populacji serpentynitowych. Nie odnotowano istotnych różnic dotyczących zawartości potasu, chromu, miedzi oraz żelaza w tkankach macierzanki zwyczajnej pomiędzy populacjami z różnych podłoży geologicznych.

Typ podłoża istotnie wpływał na poziom akumulowania makro-, mikroelementów oraz pierwiastków śladowych przez badane gatunki. Rośliny rosnące na glebach serpentynitowych pobierały kilkukrotnie więcej magnezu oraz nawet osiemdziesięciokrotnie więcej niklu w porównaniu do roślin rosnących na glebach wapiennych oraz granitowych. Zawartość wapnia w pędach roślin z podłoży wapiennych była wyższa, ale tylko w porównaniu do podłoży serpentynitowych. Zaobserwowano wyższe stężenia manganu oraz cynku w tkankach *E. cyparissias*, *G. verum*, *T. pulegioides*, *S. ochroleuca* rosnących na granitach.

Tabela 15. Skład pierwiastkowy nadziemnych części roślin występujących na murawach z różnych podłoży geologicznych (G – granity, S – serpentyny, W – wapienie). Podano średnie  $\pm$ SE. Średnie nieróżniące się istotnie przy  $p \leq 0.05$  oznaczono tymi samymi literami, osobno dla każdego gatunku

Gatunek	Liczba prób	Podłoże	Mg	Ca	K	Ni	Cr	Mn	Co	Cu	Zn	Fe	Mg/Ca
			g kg <sup>-1</sup>			mg kg <sup>-1</sup>							
<i>Euphorbia cyparissias</i>	23	G	2.28 b $\pm 0.10$	9.17 b $\pm 0.46$	14.82 b $\pm 0.55$	7.72 b $\pm 0.84$	1.54 b $\pm 0.40$	137.7 b $\pm 15.7$	1.50 a $\pm 0.23$	5.92 a $\pm 0.24$	101.9 b $\pm 10.3$	80.7 a $\pm 6.2$	0.41 b $\pm 0.01$
	26	S	6.38 c $\pm 0.24$	6.39 a $\pm 0.56$	11.47 a $\pm 0.73$	100.80 c $\pm 10.46$	0.74 a $\pm 0.07$	42.0 a $\pm 4.3$	5.73 b $\pm 0.21$	51.73 a $\pm 3.49$	42.0 a $\pm 4.3$	71.8 a $\pm 4.2$	1.97 c $\pm 0.19$
	20	W	1.77 a $\pm 0.09$	14.51 c $\pm 0.66$	14.22 b $\pm 0.43$	1.34 a $\pm 0.10$	0.97 b $\pm 0.04$	52.9 a $\pm 5.6$	2.46 b $\pm 0.33$	7.12 a $\pm 1.74$	80.0 b $\pm 5.2$	115.8 a $\pm 24.0$	0.20 a $\pm 0.01$
<i>Galium verum</i>	18	G	2.23 b $\pm 0.10$	10.14 b $\pm 0.39$	12.61 b $\pm 0.45$	1.80 a $\pm 0.19$	1.39 a $\pm 0.22$	222.9 b $\pm 19.1$	0.58 a $\pm 0.14$	8.94 b $\pm 0.45$	145.4 b $\pm 22.7$	121.0 a $\pm 19.0$	0.37 a $\pm 0.02$
	28	S	4.38 c $\pm 0.24$	7.99 a $\pm 0.43$	11.01 a $\pm 0.36$	35.65 b $\pm 5.05$	1.89 a $\pm 0.28$	70.5 a $\pm 8.8$	0.42 a $\pm 0.09$	6.69 a $\pm 0.28$	50.7 a $\pm 3.3$	146.7 a $\pm 14.6$	1.00 b $\pm 0.09$
	6	W	1.47 a $\pm 0.07$	12.42 b $\pm 0.52$	12.18 ab $\pm 0.63$	0.91 a $\pm 0.14$	1.51 a $\pm 0.33$	39.8 a $\pm 4.6$	0.47 a $\pm 0.29$	7.53 ab $\pm 0.26$	64.0 a $\pm 7.0$	119.6 a $\pm 17.9$	0.20 a $\pm 0.01$
<i>Hypericum perforatum</i>	10	G	1.74 b $\pm 0.09$	4.08 b $\pm 0.25$	8.01 a $\pm 0.32$	2.98 b $\pm 0.47$	0.98 a $\pm 0.18$	171.6 c $\pm 24.3$	0.52 a $\pm 0.11$	15.03 a $\pm 1.16$	133.8 b $\pm 22.8$	75.1 a $\pm 4.7$	0.71 a $\pm 0.03$
	8	S	3.65 c $\pm 0.24$	2.17 a $\pm 0.19$	7.42 a $\pm 0.46$	33.73 c $\pm 4.36$	0.67 a $\pm 0.18$	72.3 b $\pm 12.0$	0.86 a $\pm 0.18$	11.16 a $\pm 0.72$	49.9 a $\pm 4.6$	64.4 a $\pm 8.0$	2.93 b $\pm 0.32$
	6	W	0.88 a $\pm 0.08$	4.31 b $\pm 0.63$	6.73 a $\pm 0.59$	1.09 a $\pm 0.20$	1.08 a $\pm 0.18$	28.7 a $\pm 5.2$	0.40 a $\pm 0.05$	13.47 a $\pm 1.53$	52.5 a $\pm 6.6$	96.1 a $\pm 28.0$	0.35 a $\pm 0.02$

Gatunek	Lb prób	Podłoże	Mg	Ca	K	Ni	Cr	Mn	Co	Cu	Zn	Fe	Mg/Ca
			g kg <sup>-1</sup>			mg kg <sup>-1</sup>							
<i>Scabiosa ochroleuca</i>	4	G	1.60 b ± 0.12	8.09 ab ± 0.55	15.15 b ± 0.66	4.64 b ± 0.99	0.86 a ± 0.10	65.8 b ± 13.0	0.25 a ± 0.11	7.77 b ± 0.43	96.41 b ± 45.68	75.8 a ± 7.6	0.33 ab ± 0.01
	6	S	4.22 c ± 0.27	6.13 a ± 1.00	9.10 a ± 0.34	27.86 c ± 3.34	0.84 a ± 0.23	20.3 a ± 2.9	0.37 a ± 0.19	4.87 a ± 0.36	30.69 a ± 2.05	77.2 a ± 7.1	1.29 b ± 0.20
	6	W	1.44 a ± 0.07	11.05 b ± 0.69	13.20 b ± 0.90	1.63 a ± 0.36	1.13 a ± 0.23	19.4 a ± 2.9	0.28 a ± 0.09	7.00 b ± 0.23	34.06 ab ± 1.86	83.8 a ± 10.8	0.22 a ± 0.02
<i>Thymus pulegioides</i>	11	G	2.81 a ± 0.15	7.83 a ± 0.40	15.62 a ± 0.63	4.41 a ± 0.93	4.93 a ± 4.16	219.0 b ± 24.6	0.68 ab ± 0.28	11.22 a ± 0.83	108.97 b ± 11.02	378.2 a ± 243.5	0.60 a ± 0.02
	16	S	6.34 b ± 0.35	5.47 a ± 0.43	14.50 a ± 0.82	44.92 b ± 9.39	1.49 a ± 0.69	59.9 a ± 8.8	1.22 b ± 0.21	10.10 a ± 0.40	53.48 a ± 3.48	226.0 a ± 55.0	2.11 b ± 0.22
	9	W	2.73 a ± 0.16	11.52 b ± 0.39	14.08 a ± 0.64	0.30 a ± 0.10	0.13 a ± 0.11	42.2 a ± 4.0	0.03 a ± 0.03	10.52 a ± 0.45	76.28 ab ± 8.88	208.0 a ± 45.4	0.39 a ± 0.02

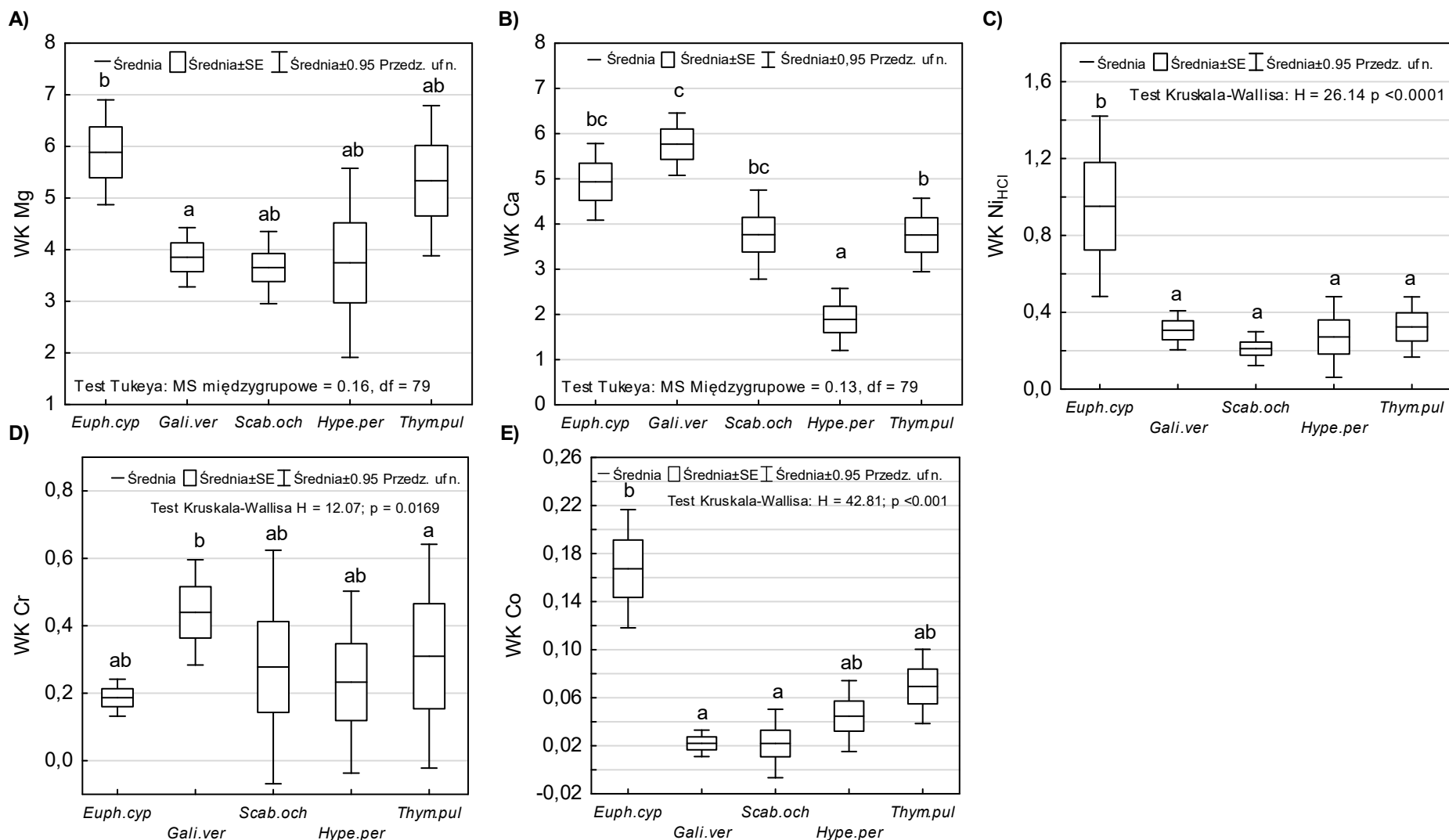
### 5.2.3.2 Współczynniki koncentracji metali

Dla gatunków rosnących na glebach serpentynitowych obliczono współczynnik koncentracji (WK) w literaturze określany jako BAF lub BF (ang. bioaccumulation factor). Na rysunkach 15A–E przedstawiono wartości współczynników koncentracji wybranych metali dla pięciu gatunków z gleb serpentynitowych badanych muraw. Wartość współczynnika określała zdolność gatunku do pobierania poszczególnych metali względem ich zawartości w podłożu. Współczynniki te dotyczą zawartości form potencjalnie przyswajalnych w glebach. Dane współczynników dla Ca i Mg po transformacji logarytmicznej ( $\ln$ ) oraz jednoczynnikowej analizie wariancji testowano testem Tukeya dla różnych  $n$ . W przypadku WK dla  $Ni_{HCl}$ , Cr i Co analizie nieparametrycznej poddano surowe dane, stosując test Kruskala-Wallisa.

Najwyższe wartości  $WK_{Mg}$  odnotowano u *Euphorbia cyparissias* oraz *Thymus pulegioides*, podczas gdy współczynniki  $WK_{Mg}$  u pozostałych gatunków były bardzo zbliżone do siebie. *Hypericum perforatum* odznaczał się najniższą zdolnością do pobierania wapnia, a wartość jego  $WK_{Ca}$  była istotnie niższa od wszystkich badanych gatunków. Z kolei *Galium verum* charakteryzowały się takim samym stopniem wykorzystania wapnia dostępnego w glebie co wilczomlec sosnka oraz driakiew żółta, natomiast istotnie więcej pobierała w poprównaniu do macierzanki zwyczajnej. Wszystkie gatunki pobierały nikiel na podobnym poziomie w stosunku do ilości zawartego metalu w glebie. Wyjątek stanowił *Euphorbia cyparissias*, którego zdolność do akumulowania niklu w nadziemnych częściach była kilkukrotnie wyższa w stosunku do pozostałych gatunków, podobnie jak w przypadku kobaltu. Wybrane gatunki odznaczały się zbliżonymi wartościami współczynników dla chromu.

Gatunki ciepłolubnych muraw w różnym stopniu akumulowały w nadziemnych częściach badane pierwiastki. Czołowe miejsce na tle pozostałych gatunków w zdolności pobierania niklu oraz kobaltu zajął wilczomlec sosnka. Odznaczał się też wysokimi wartościami współczynników koncentracji magnezu oraz wapnia. Zaobserwowano także, że dziurawiec zwyczajny odbiegał od reszty badanych gatunków pod względem akumulowania wapnia, wykazując najniższą wartość  $WK_{Ca}$ .





Rys. 15. Współczynniki koncentracji dla: A) magnezu, B) wapnia, C) Ni<sub>HCl</sub>, D) chromu i E) kobaltu w pędach roślin z podłoża serpentynitowych; skróty nazw gatunków rozwinięto w załączniku 10.1

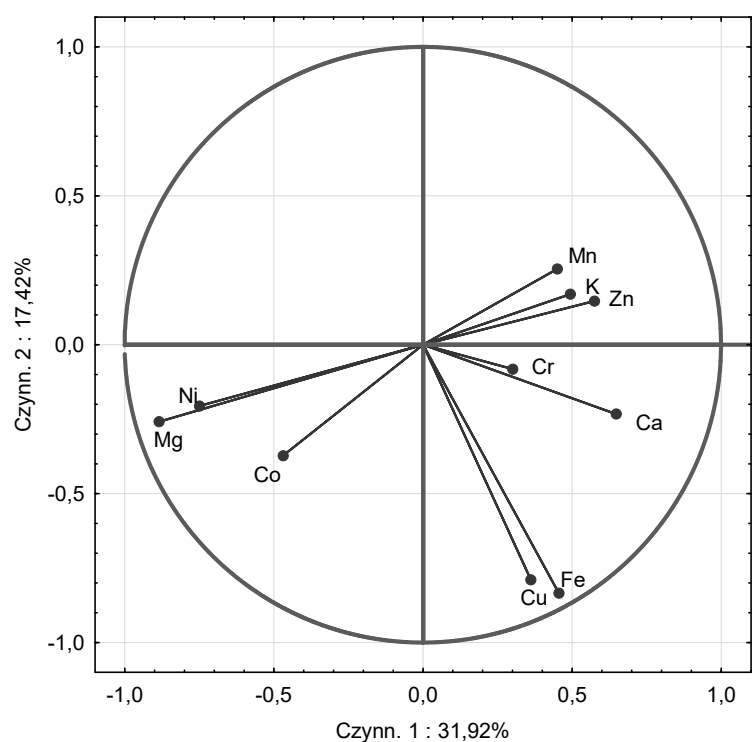
### 5.2.3.3 Analizy wielozmienne składu chemicznego wybranych gatunków

W celu przedstawienia ogólnych zależności pomiędzy zawartościami pierwiastków w częściach nadziemnych wybranych gatunków badanych zbiorowisk trawiastych posłużono się analizą składowych głównych. Analizy wykonano na podstawie macierzy korelacji. Wyniki przedstawiono w tabelach 16–20 oraz na rysunkach 16–25. Brano pod uwagę składowe główne, o wartości własnej powyżej 1, zgodnie z kryterium Kaisera (Stanisz 2006). W przypadku analizy składu chemicznego wilczomleczka sosnki kryterium to spełniały cztery pierwsze składowe, które wyjaśniały 71% ogólnej zmienności.

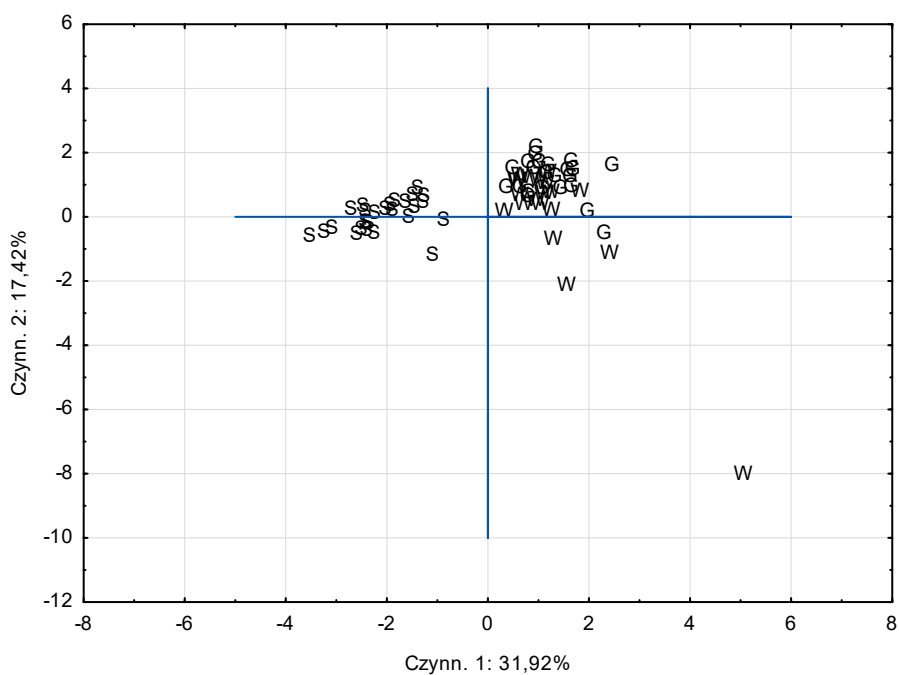
Tabela 16. Zestawienie wartości własnych z procentowym udziałem w ogólnej wariancji składowych głównych oraz ładunków czynnikowych zmiennych dla składu chemicznego *E. cyparissias*

PARAMETR	Czynnik 1 (PC1)	Czynnik 2 (PC2)	Czynnik 3 (PC3)	Czynnik 4 (PC4)
Wartości własne	3.19	1.74	1.13	1.07
% ogółu wariancji	31.92	17.42	11.33	10.70
ZMIENNE	Ładunki czynnikowe zmiennych			
Mg	-0.885	-0.258	-0.161	-0.170
Ca	0.648	-0.233	0.309	0.426
K	0.495	0.170	0.032	0.321
Ni	-0.750	-0.206	-0.073	-0.060
Cr	0.301	-0.082	0.489	-0.666
Co	-0.469	-0.372	-0.243	0.399
Cu	0.362	-0.790	-0.228	-0.178
Zn	0.575	0.147	-0.555	-0.011
Mn	0.451	0.255	-0.589	-0.343
Fe	0.455	-0.834	-0.014	-0.037

Zwartości magnezu oraz niklu w tkankach roślin były najsilniej ujemnie skorelowane, a wapnia dodatnio z osią czynnika pierwszego i w największym stopniu wpływały na zróżnicowanie badanych prób (tab. 16, rys. 16). Koncentracje żelaza i miedzi były natomiast najbardziej powiązane z osią czynnika drugiego.



Rys. 16. Wykres analizy PCA dla zawartości pierwiastków w pędach *Euphorbia cyparissias* z badanych muraw



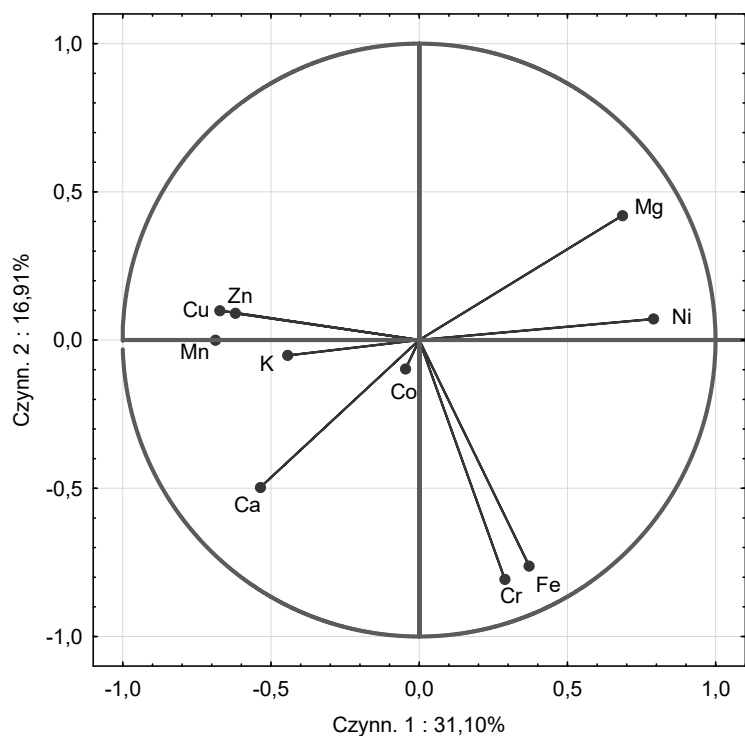
Rys. 17. Wykres analizy PCA dla składu pierwiastkowego pędów *Euphorbia cyparissias* z powierzchni badawczych na różnych podłożach (G – granit, S – serpentynit, W – wapień)

Rozrzut powierzchni w przestrzeni osi PCA wyraźnie wskazuje na wpływ podłoża na skład pierwiastkowy wilczomlecza sosnki (rys. 17). Próby z masywów serpentynitowych, rozmieszczone były wzdłuż osi czynnika pierwszego i stanowiły oddzielny zbiór. Próby z granitów układały się wzdłuż gradientu koncentracji manganu, cynku oraz potasu w roślinach.

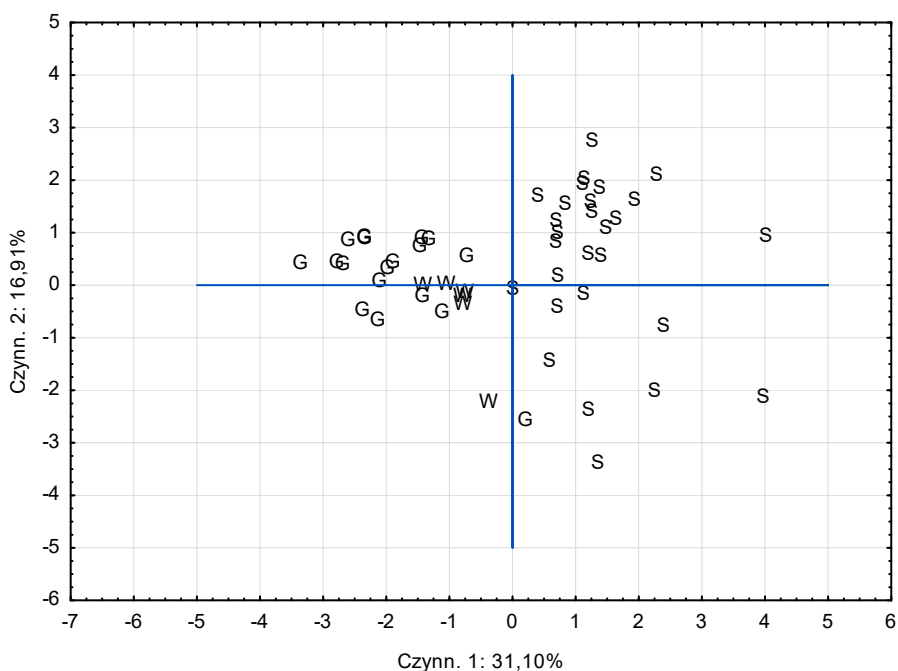
W przypadku *Galium verum* do analizy PCA wyselekcjonowano trzy pierwsze składowe, które objaśniały 62% całkowitej zmienności. Nikiel wykazywał silną dodatnią korelację z osią czynnika pierwszego i w najwyższym stopniu wpływał na zróżnicowanie prób (tab. 17, rys. 18). Istotną zależność odnotowano także dla koncentracji magnezu oraz manganu, skorelowanych z osią PC 1, odpowiednio dodatnio i ujemnie. Z osią czynnika drugiego najsilniej skorelowane były zawartości chromu oraz żelaza.

Tabela 17. Zestawienie wartości własnych wraz z procentowym udziałem w ogólnej wariancji składowych głównych oraz ładunków czynnikowych zmiennych dla składu chemicznego *Galium verum*

PARAMETR	Czynnik 1 (PC1)	Czynnik 2 (PC2)	Czynnik 3 (PC3)
Wartości własne	3.11	1.69	1.40
% ogółu wariancji	31.10	16.91	14.00
ZMIENNE	Ładunki czynnikowe zmiennych		
Mg	0.685	0.420	-0.312
Ca	-0.536	-0.497	0.437
K	-0.444	-0.052	-0.346
Ni	0.790	0.071	-0.298
Cr	0.289	-0.808	-0.155
Co	-0.046	-0.098	-0.662
Cu	-0.672	0.099	-0.444
Zn	-0.620	0.090	-0.555
Mn	-0.688	-0.001	-0.363
Fe	0.371	-0.762	-0.289



Rys. 18. Wykres analizy PCA dla zawartości pierwiastków w pędach *Galium verum* z badanych muraw



Rys. 19. Wykres analizy PCA dla składu pierwiastkowego pędów *Galium verum* z badanych powierzchni na różnych podłożach (G – granit, S – serpentynit, W – wapień)

Analizy wykazały, że pędy przytulii właściwej z różnych podłoży geologicznych różniły się składem pierwiastkowym zależnie od typu podłoża, na którym rosły (rys. 19). Próby z powierzchni serpentynitowych stanowiły najbardziej rozproszoną grupę, układając

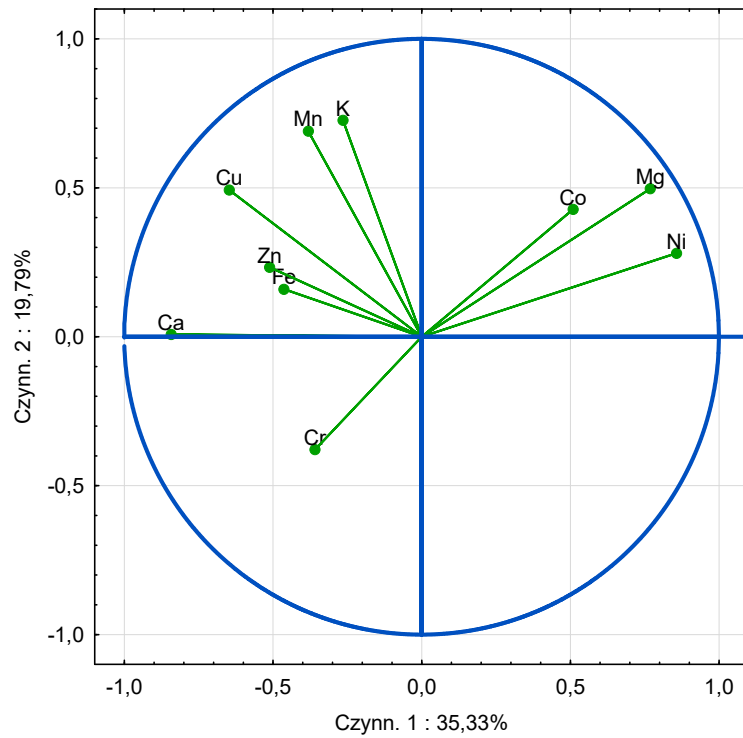
się wzdłuż niemal całej długości osi czynnika drugiego. Powierzchnie z granitów układały się wzdłuż wektorów związanych z zawartościami manganu, miedzi, cynku oraz potasu.

W analizie PCA składu pierwiastkowego dziurawca zwyczajnego *Hypericum perforatum* wzięto pod uwagę trzy pierwsze składowe. Objaśniały one około 69% całkowitej zmienności. Podobnie jak u pozostałych gatunków, koncentracje niklu i magnezu, dodatnio skorelowane z PC1, różnicowały w najwyższym stopniu badane próby, a zaraz po nich ujemnie skorelowane zawartości wapnia (tab. 18, rys. 20). Najsilniej skorelowane z osią czynnika drugiego były zawartości potasu i manganu.

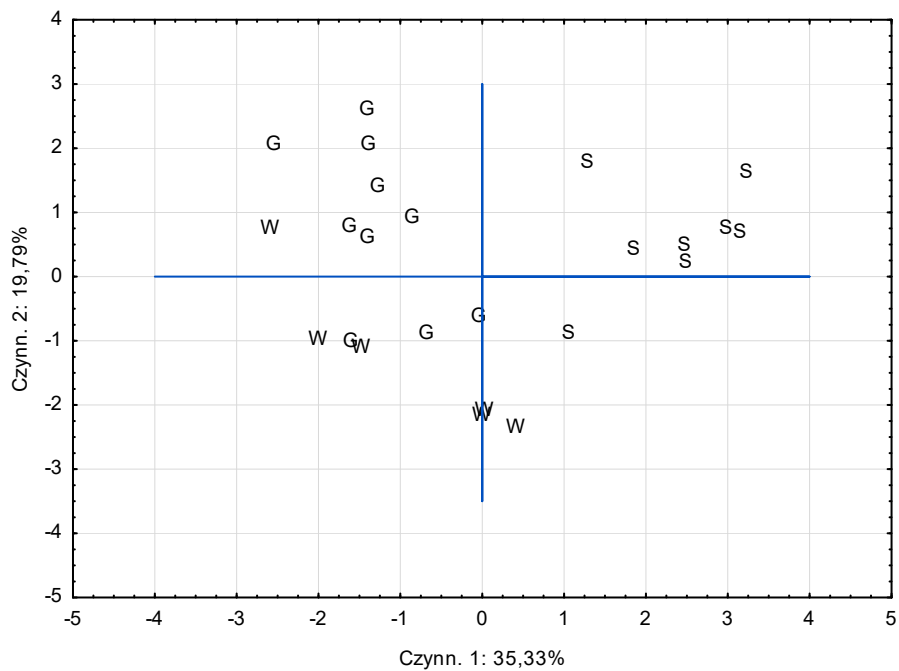
Tabela 18. Zestawienie wartości własnych wraz z procentowym udziałem w ogólnej wariancji składowych głównych oraz ładunków czynnikowych zmiennych dla składu chemicznego *Hypericum perforatum*

PARAMETR	Czynnik 1 (PC1)	Czynnik 2 (PC2)	Czynnik 3 (PC3)
Wartości własne	3.53	1.98	1.43
% ogółu wariancji	35.33	19.79	14.26
ZMIENNE	Ładunki czynnikowe zmiennych		
Mg	0.768	0.497	0.047
Ca	-0.843	0.008	0.245
K	-0.265	0.727	-0.029
Ni	0.857	0.280	0.013
Cr	-0.359	-0.379	-0.632
Co	0.509	0.427	-0.192
Cu	-0.648	0.493	0.234
Zn	-0.511	0.233	-0.637
Mn	-0.382	0.691	-0.329
Fe	-0.463	0.160	0.598

Próby z powierzchni na granitach układały się wzdłuż osi czynnika drugiego, serpentynitowe natomiast były zgrupowane w obszarze wysokich wartości niklu, magnezu oraz kobaltu (rys. 21).



Rys. 20. Wykres analizy PCA dla zawartości pierwiastków w pędach *Hypericum perforatum* z badanych muraw



Rys. 21. Wykres analizy PCA dla składu pierwiastkowego pędów *Hypericum perforatum* z badanych powierzchni na różnych podłożach (G – granit, S – serpentyt, W – wapień)

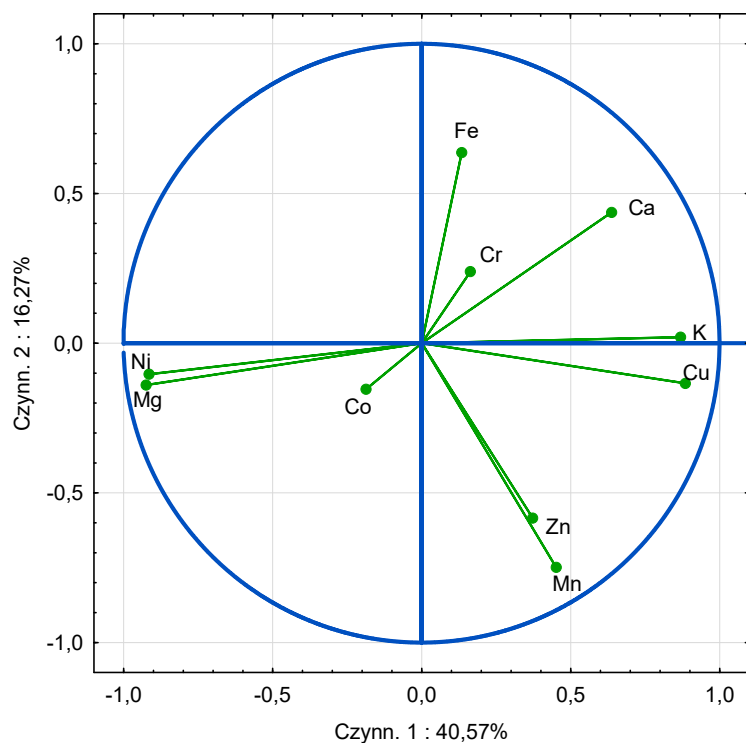
U driakwi żółtej *Scabiosa ochroleuca* trzy pierwsze składowe główne objaśniały około 69% całkowitej zmienności zawartości pierwiastków w pędach. Stwierdzono bardzo silną korelację zawartości magnezu oraz niklu, a także potasu i miedzi w tkankach driakwi z osią czynnika pierwszego (tab. 19, rys. 22). Natomiast z osią PC 2 najbardziej i jednocześnie ujemnie powiązana była zawartość manganu.

Tabela 19. Zestawienie wartości własnych wraz z procentowym udziałem w ogólnej wariancji składowych głównych oraz ładunków czynnikowych zmiennych dla składu chemicznego *Scabiosa ochroleuca*

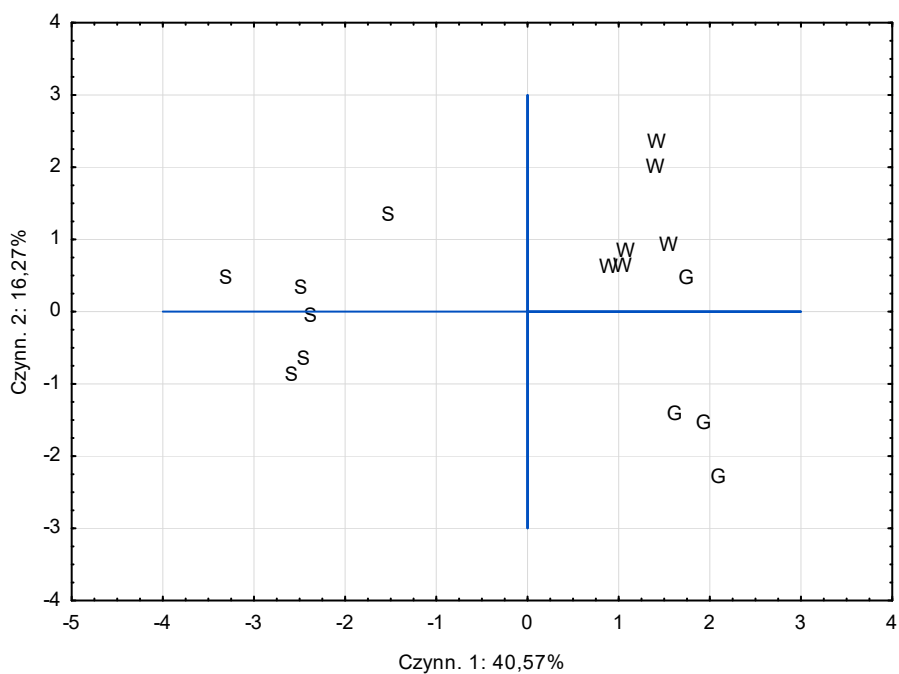
PARAMETR	Czynnik 1 (PC1)	Czynnik 2 (PC2)	Czynnik 3 (PC3)
Wartości własne	4.06	1.63	1.26
% ogółu wariancji	40.57	16.27	12.59
ZMIENNE	Ładunki czynnikowe zmiennych		
Mg	-0.925	-0.140	-0.054
Ca	0.637	0.437	-0.363
K	0.869	0.020	0.099
Ni	-0.915	-0.104	0.174
Cr	0.163	0.239	0.375
Co	-0.187	-0.154	0.701
Cu	0.885	-0.134	-0.040
Zn	0.372	-0.584	0.143
Mn	0.451	-0.748	0.147
Fe	0.134	0.637	0.581

Próby dotyczące składu pierwiastkowego *Scabiosa ochroleuca* zostały zgrupowane w trzy oddzielne zbiory w przestrzeni ordynacyjnej (rys. 23). Populacje serpentynitowe driakwi żółtej skupiały się w obszarze wysokich koncentracji niklu i magnezu, granitowe – cynku i manganu, natomiast z wapieni – wapnia, żelazu oraz chromu w pędach roślin. Można zatem dostrzec wpływ podłoża na skład pierwiastkowy nadziemnych części u tego gatunku.





Rys. 22. Wykres analizy PCA dla zawartości pierwiastków w pędach *Scabiosa ochroleuca* z badanych muraw



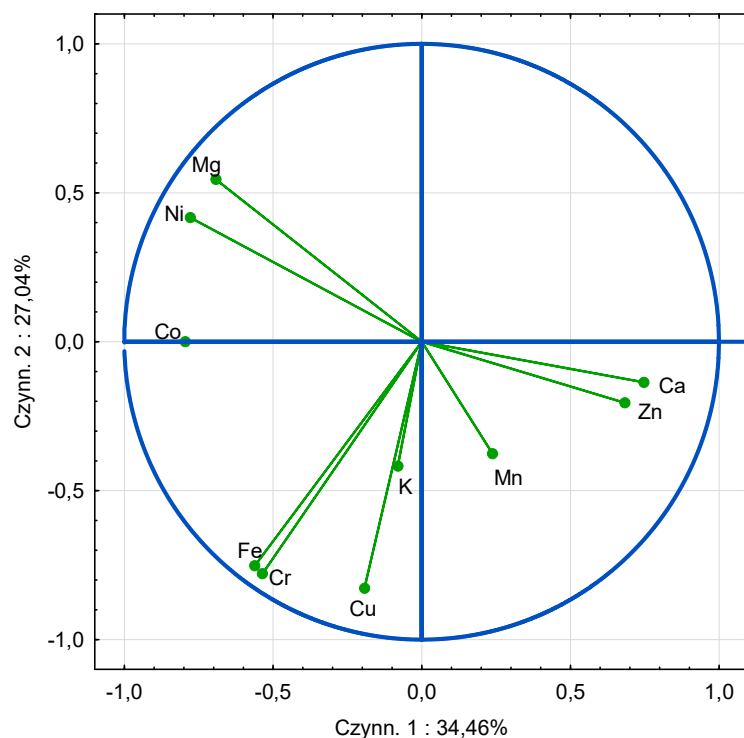
Rys. 23. Wykres analizy PCA dla składu pierwiastkowego pędów *Scabiosa ochroleuca* z badanych powierzchni na różnych podłożach (G – granit, S – serpentynit, W – wapień)

W przypadku macierzanki zwyczajnej *Thymus pulegioides* koncentracje kobaltu oraz niklu najsilniej skorelowane były z osią czynnika pierwszego i najbardziej różnicowały badane próby. Dużą zależność stwierdzono także pomiędzy osią czynnika pierwszego a zawartościami wapnia, magnezu jak również cynku w badanym materiale (tab. 20, rys. 24). Z osią czynnika drugiego najsilniej skorelowane były zawartości miedzi, chromu i żelaza w częściach nadziemnych macierzanki.

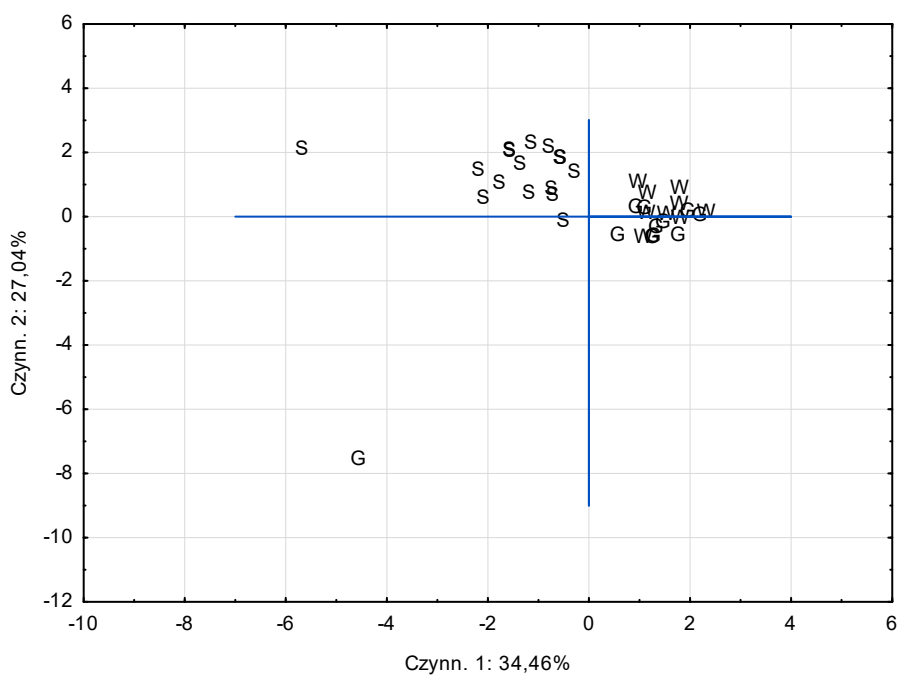
Tabela 20. Zestawienie wartości własnych wraz z procentowym udziałem w ogólnej wariancji składowych głównych oraz ładunków czynnikowych zmiennych dla składu chemicznego *Thymus pulegioides*

PARAMETR	Czynnik 1 (PC1)	Czynnik 2 (PC2)	Czynnik 3 (PC3)	Czynnik 4 (PC4)
Wartości własne	3.45	2.70	1.30	1.05
% ogółu wariancji	34.46	27.04	13.01	10.49
ZMIENNE	Ładunki czynnikowe zmiennych			
Mg	-0.692	0.545	0.050	0.167
Ca	0.747	-0.136	-0.274	-0.377
K	-0.081	-0.417	0.054	0.824
Ni	-0.779	0.417	0.224	-0.044
Cr	-0.536	-0.779	-0.042	-0.192
Co	-0.796	0.000	0.339	-0.247
Cu	-0.193	-0.828	-0.228	0.157
Zn	0.683	-0.205	0.541	0.091
Mn	0.238	-0.376	0.837	-0.125
Fe	-0.561	-0.752	-0.092	-0.229

Próby z serpentynitów odseparowane były od pozostałych i związane były z wysokimi koncentracjami niklu i magnezu, podobnie jak u pozostałych gatunków, a także kobaltu (rys. 25). Próby macierzanki pobrane z wapieni i granitów nie stanowiły wyraźnie oddzielnych zbiorów.



Rys. 24. Wykres analizy PCA dla zawartości pierwiastków w pędach *Thymus pulegioides* z badanych muraw



Rys. 25. Wykres analizy PCA dla składu pierwiastkowego pędów *Thymus pulegioides* z badanych powierzchni na różnych podłożach (G – granit, S – serpentynit, W – wapień)

U wszystkich badanych gatunków największy wpływ na zróżnicowanie powierzchni badawczych miały zawartości niklu oraz magnezu w pędach roślin, w każdym przypadku były to pierwiastki w grupie trzech najsilniej skorelowanych z osią czynnika pierwszego. Natomiast u macierzanki zwyczajnej magnez znalazł się na czwartym miejscu. U tego gatunku zawartość kobaltu najsilniej różnicowała badane powierzchnie, a w pozostałych przypadkach był to nikiel lub magnez.

W wypadku wszystkich badanych gatunków czynnikami różnicującymi skład pierwiastkowy są wapń i specyficzne dla siedlisk serpentynitowych nikiel i magnez. Powierzchnie z różnych podłoży geologicznych separowały się w oddzielne zbiory. Wzdłuż osi czynnika pierwszego, najsilniej związanej z zawartościami niklu i magnezu, izolują się od pozostałych powierzchnie serpentynitowe. Najwyraźniej zaznaczyło się to u driakwi żółtej. Właściwości gleb serpentynitowych w najwyższym stopniu zadecydowały o zróżnicowaniu powierzchni badawczych. Wszystkie gatunki, wyłączając *Scabiosa ochroleuca*, wykazywały istotnie wyższe koncentracje magnezu oraz niklu, rosnąc na podłożu serpentynitowym, z czego *Euphorbia cyparissias* kumulował nawet trzykrotnie więcej niklu niż pozostałe gatunki.

### **5.3 Badania doświadczalne**

#### **5.3.1 Wzrost i pobieranie składników mineralnych przez rośliny uprawiane w kulturach wodnych przy różnych stężeniach niklu oraz stosunku Mg/Ca**

W celu oceny wpływu specyficznych właściwości geochemicznych siedlisk serpentynitowych na wzrost i pobieranie składników mineralnych przez wybrane gatunki roślin wykonano doświadczenie w kulturach wodnych w komorze klimatycznej. Badano wpływ jednoczesnego działania na populacje nieserpentynitowe i serpentynitowe specyficznych czynników współtworzących tzw. kompleks serpentynitowy – wysokich, potencjalnie toksycznych koncentracji niklu i specyficznej relacji pomiędzy wapniem i magnezem, z przewagą tego ostatniego pierwiastka. Doświadczenia w kulturach wodnych zaprojektowano w układzie porównań populacji i ich reakcji na odmienne konfiguracje stężeń niklu i wartości stosunków Mg/Ca. Ponieważ jednak w większości uzyskane zmienne nie spełniały warunków wieloczynnikowej analizy wariancji postanowiono dla ujednolicenia porównań wykonać analizy jednokierunkowe analizy wariancji z testowaniem

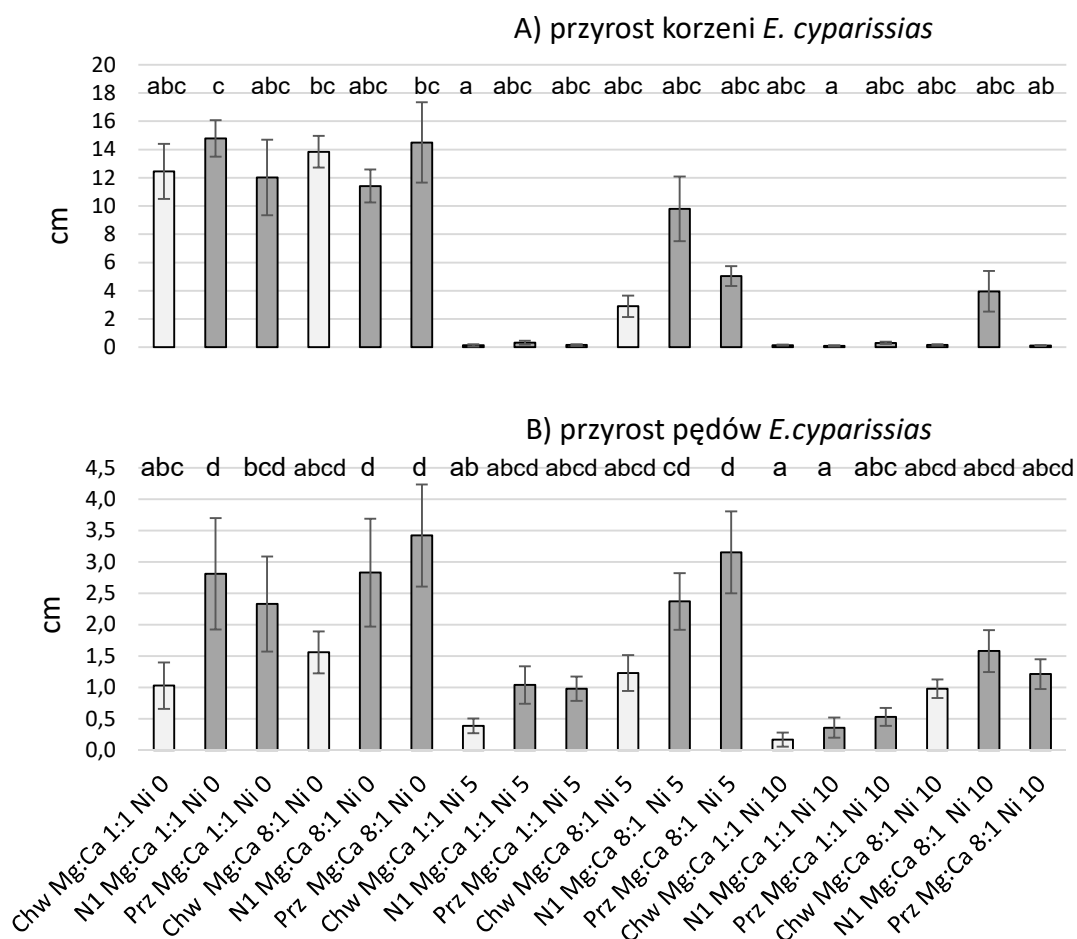
*post hoc* testem HSD Tukeya lub nieparametrycznym odpowiednikiem ANOVA – testem Kruskala-Wallis.

Wariant ze zrównoważonym stosunkiem molowym wapnia i magnezu bez dodatku niklu przyjęto za kontrolny dla badanych populacji. Odnoszono do niego długości korzeni roślin, co było podstawą obliczenia wartości indeksu tolerancji na nikiel (IT) przy zmiennych wartościach stosunku Mg/Ca (por. rozdz. 4.4.1) O wyborze *Euphorbia cyparissias* do doświadczenia zadecydowała zdolność do kumulowania wysokich koncentracji niklu w populacjach serpentynitowych tego gatunku (Żołnierz 1993, 2007 oraz wyniki przedstawione w rozdz. 5.2.3). O wyborze *Galium verum* zdecydowano po serii pilotowych doświadczeń z kiełkowaniem nasion populacji serpentynitowych i nieserpentynitowych kilku gatunków roślin w roztworach z dodatkiem niklu. Do doświadczeń wybrano sadzonki *E. cyparissias* wyrównane pod względem rozmiarów, o średniej wysokości pędu i długości korzenia odpowiednio  $7.0 \text{ cm} \pm 0.16 (\pm \text{SE})$  i  $3.9 \text{ cm} \pm 0.14 (\pm \text{SE})$  oraz siewki *G. verum* o średniej wysokości pędu i długości korzenia odpowiednio  $1.7 \text{ cm} \pm 0.04 (\pm \text{SE})$  i  $3.6 \text{ cm} \pm 0.07 (\pm \text{SE})$ , dlatego analizie statystycznej poddano wartości wysokości pędów i długości korzeni pod koniec doświadczenia względem wartości początkowych. Dane dotyczące składu pierwiastkowego *E. cyparissias* (Ca, Ca/Mg, Fe) oraz IT poddano transformacji logarytmicznej, dzięki temu spełnione zostały wymagania analizy wariancji ANOVA, w pozostałych przypadkach analizie poddano nieprzekształcone dane wykorzystując metody nieparametryczne. Dane odnoszące się do wszystkich badanych parametrów u *G. verum* nawet po zastosowaniu transformacji nie spełniały wymagań analizy wariancji, dlatego średnie analizowano metodą nieparametryczną po teście Kruskala-Wallis.

### **5.3.1.1 Wzrost i skład pierwiastkowy wilczomlecza sosnki *Euphorbia cyparissias***

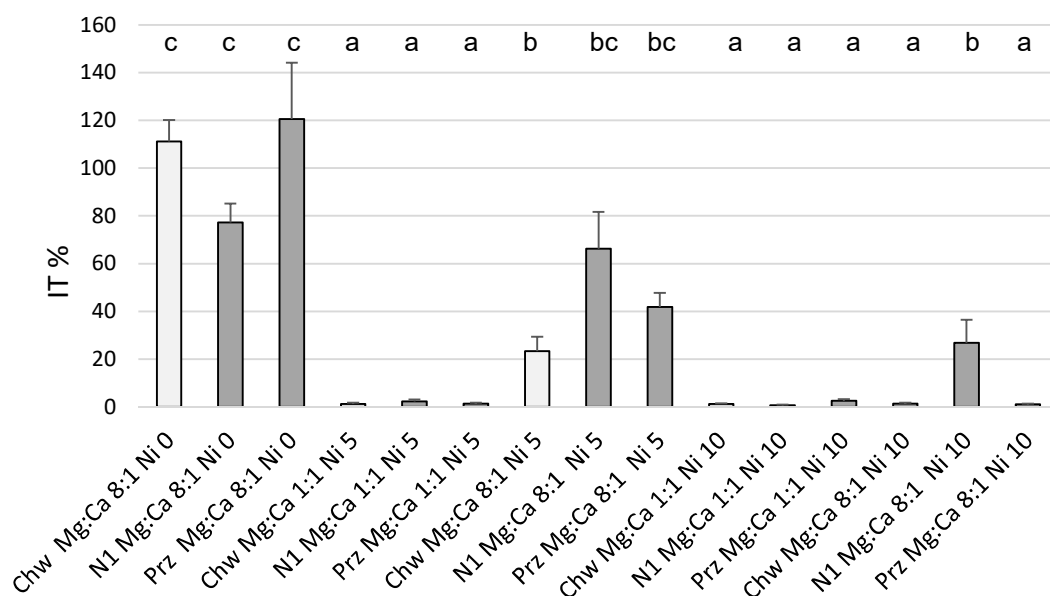
Na rysunku 26A przedstawiono wyniki eksperymentu w kulturach wodnych z wilczomleczem sosnką, w którym mierzono przyrost korzeni roślin. Żadna z badanych populacji nie wykazała istotnej statystycznie reakcji na wzrost stosunku Mg/Ca w wariantach bez dodatku niklu. W czasie doświadczenia obserwowano łagodzący wpływ podwyższonego poziomu magnezu na toksyczność niklu. Wpływ ten był bardziej wyraźny u roślin z populacji serpentynitowych, zwłaszcza u tej z Nasławic. Nawet przy wyższym stężeniu niklu ( $10 \text{ mg dm}^{-3}$ ) korzenie tych roślin wykazywały powolny wzrost w odróżnieniu

od całkowicie zahamowanego wzrostu u pozostałych badanych populacji. Różnice te jednak nie osiągnęły poziomu istotności statystycznej w momencie zakończenia doświadczenia.



Rys. 26. Przyrost głównego korzenia (a) oraz pędu (b) *E. cyparissias* po ekspozycji na różne koncentracje Ni (0, 5, 10 mg Ni dm<sup>-3</sup>) przy zróżnicowanym stosunku Mg/Ca (1:1 i 8:1) w pożywce w populacjach z granitów (Chw – zaznaczono jasnoszarym kolorem) i serpentynitów (N1, Prz). Podano średnie ±SE. Warianty doświadczenia oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie. Dla przyrostu korzeni zastosowano test Kruskala Wallisa (H=76.5; p≤0.05), dla przyrostu pędów jednokierunkową analizę wariancji z testem HSD Tukeya (F=6.17, p <0.0001)

Przyrosty pędów badanych populacji nie wykazywały zróżnicowania w reakcji na stężenie niklu oraz proporcje między Mg i Ca w pożywce (26B). Wzrost stosunku Mg/Ca w pożywce powodował nieznacznie dłuższe przyrosty pędów roślin w obrębie kombinacji z tym samym stężeniem niklu, co analogicznie jak w wypadku korzeni wskazuje na osłabianie toksycznego oddziaływania niklu przez wysokie koncentracje magnezu. Podobnie jak w przypadku przyrostu korzeni, różnice nie uzyskały istotności statystycznej.



Rys. 27. Indeks tolerancji (IT) liczony jako stosunek średniej długości korzenia głównego do długości korzeni z wariantu kontrolnego (Mg/Ca 1:1, bez dodatku Ni) po ekspozycji na 5 i 10 mg Ni dm<sup>-3</sup> przy różnych wartościach stosunku Mg/Ca (1:1 i 8:1) w pożywce w populacjach *Euphorbia cyparissias* z granitów (Chw – zaznaczono jasnoszarym kolorem) i serpentynitów (N1, Prz). Podano średnie ±SE. Warianty doświadczenia oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie przy (Test HSD Tukeya: F=62.2, p < 0.0001)

Istotą testu mierzącego tolerancję badanych roślin na nikiel było porównanie wzrostu długości korzenia głównego w roztworach z dodatkiem tego pierwiastka w odniesieniu do wariantu bez niklu i ze zrównoważonym stosunkiem Mg/Ca 1:1. Dodatek 5 mg Ni dm<sup>-3</sup> radykalnie hamował wzrost korzeni wszystkich trzech populacji przy równych stężeniach Mg i Ca (rys. 27). Natomiast wzrost stężenia magnezu osłabiał toksyczność niklu, a wartości IT populacji serpentynitowych były dwu- i trzykrotnie wyższe w porównaniu z populacją z granitu. Populacja z Nasławic zachowała zdolność wzrostu korzeni nawet przy dawce Ni 10 mg Ni dm<sup>-3</sup> przy Mg/Ca 8:1.

Podsumowując można stwierdzić, że rosnące stężenia magnezu osłabiały toksyczność niklu w populacjach z obu podłoży, przy czym mechanizm ten działał silniej w wypadku populacji serpentynitowych.

W tabeli 21 przedstawiono wyniki analiz zawartości wybranych pierwiastków w pędach wilczomlecza sosnki po zakończonym doświadczeniu w kulturach wodnych. Z powodu braku materiału, nie wykonano analizy składu chemicznego roślin z populacji granitowej uprawianej w stężeniu 10 mg Ni dm<sup>-3</sup> oraz stosunku Mg/Ca 1:1. Analizy

wykazały, że populacje serpentynitowe wykazują tendencję do silniejszego gromadzenia magnezu i słabszego wapnia w pędach badanych roślin w porównaniu z populacją z granitu. Tendencja ta w większości wypadków nie osiąga poziomu istotności statystycznej w porównaniach zawartości tych pierwiastków rozpatrywanych z osobna. Jest jednak wyraźnie widoczna i istotna statystycznie w wartościach stosunku Mg/Ca. Zauważyć należy, że trzy- do sześciokrotna przewaga wartości stosunku Mg/Ca w populacjach z serpentynitów dotyczy również wariantów doświadczenia z wyrównanymi stężeniami tych pierwiastków w pożywce. Zawartości niklu w pędach roślin obu populacji w wariantach bez tego metalu w pożywce wynikały z kumulacji niklu pobranego z gleb przed wzięciem ich do doświadczenia. Odpowiadały one koncentracjom w roślinach rosnących na glebach nieserpentynitowych i serpentynitowych. W wariantach z udziałem niklu w pożywce wszystkie trzy populacje gromadziły wielokrotnie wyższe koncentracje, przekraczające w ostatnim z wariantów nawet  $1000 \text{ mg kg}^{-1}$  s.m. Nie wystąpiły jednak różnice pomiędzy populacją wilczomlecza z granitu i serpentynitowymi. Nie stwierdzono wyraźnego i czytelnego wpływu zastosowanych wariantów doświadczenia na pobieranie pozostałych analizowanych pierwiastków.

Wyniki doświadczenia z wilczomleczem sosnką w kulturach wodnych wykazały toksyczny wpływ obecności niklu w pożywce na poziomie  $5$  i  $10 \text{ mg dm}^{-3}$  i zrównoważonym stosunku molarnym magnezu do wapnia, przy których następowało zahamowanie przyrostów pędów oraz korzeni badanych roślin, a także spadek wartości indeksu tolerancji, w porównaniu z wariantem kontrolnym. Efekt ten był łagodzony dzięki przewadze magnezu nad wapniem w pożywce (Mg/Ca 8:1). Osobniki populacji serpentynitowych *Euphorbia cyparissias* wykazywały wyższą tolerancję na specyficzne właściwości siedlisk serpentynitowych w stosunku do populacji granitowej, wyrażoną indeksem tolerancji (IT). Ponadto wczesne zamieranie osobników wilczomlecza z populacji granitowej wskazywało na większą wrażliwość tych roślin na badane czynniki w porównaniu do obu populacji serpentynitowych. Wyniki analiz składu pierwiastkowego materiału roślinnego nie wykazały istotnych różnic w zawartości magnezu w pędach wilczomlecza pomiędzy roślinami uprawianymi przy różnych stężeniach metalu w pożywce. Jedynie u populacji z Nasławic przy  $5 \text{ mg Ni dm}^{-3}$  zwiększenie stężenia magnezu w roztworze istotnie zwiększyło jego akumulację w tkankach roślin. Populacje serpentynitowe wykazywały większą zdolność do kumulowania magnezu w pędach roślin w ilościach przewyższających wapń niż populacja granitowa z Chwałkowa.



Tabela 21. Skład pierwiastkowy pędów *Euphorbia cyparissias* pochodzącego z granitów (Chw) oraz serpentynitów (N1, Prz) uprawianego w kulturach wodnych przy różnych wartościach stosunku Mg/Ca oraz stężeniach Ni. Podano średnie  $\pm$ SE; średnie oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie. Istotności różnic badano testem Tukeya (Ca, Mg/Ca, Fe) po jednokierunkowej analizie wariancji oraz testem Kruskala-Wallisa (Mg, K, Ni, Mn, Cu, Zn); n.o. – nie oznaczano

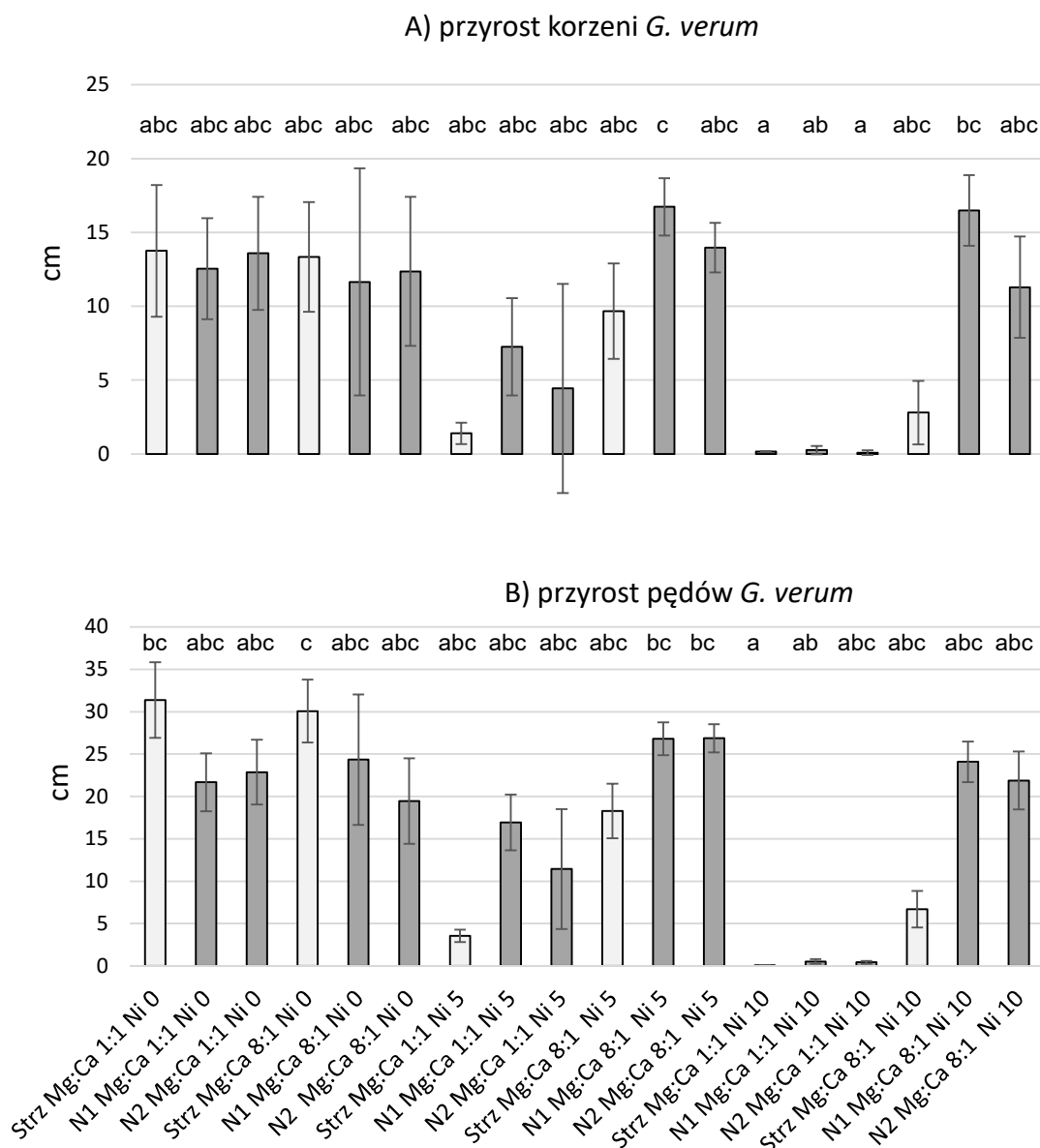
Populacja	Pożywka		Mg	Ca	K	Mg/Ca	Ni	Mn	Cu	Zn	Fe
	Ni mg dm <sup>-3</sup>	Mg/Ca mol/mol	g kg <sup>-1</sup> s.m.			mol/mol	mg kg <sup>-1</sup> s.m.				
Chw	0	1:1	1.91ad $\pm$ 0.06	10.60 cde $\pm$ 0.99	36.16 b $\pm$ 0.34	0.31 a $\pm$ 0.03	4.2 ab $\pm$ 0.6	169.4 d $\pm$ 9.1	11.5 bc $\pm$ 3.1	88.9 ab $\pm$ 9.3	179.0 abcd $\pm$ 32.9
N1	0	1:1	4.88 abcd $\pm$ 0.71	7.98 bcde $\pm$ 0.89	28.41 ab $\pm$ 1.81	1.01 bc $\pm$ 0.05	48.2 abc $\pm$ 13.2	94.7 abcd $\pm$ 9.2	6.5 abc $\pm$ 0.7	72.0 ab $\pm$ 6.4	172.4 abc $\pm$ 16.7
Prz	0	1:1	6.18 abcd $\pm$ 0.28	5.16 ab $\pm$ 0.45	31.26 ab $\pm$ 3.17	2.06 de $\pm$ 0.26	51.4 abc $\pm$ 4.7	92.5 abcd $\pm$ 24.3	7.4 abc $\pm$ 0.4	76.1 ab $\pm$ 7.3	168.3 abc $\pm$ 16.1
Chw	0	8:1	7.24 abcd $\pm$ 0.72	10.77 de $\pm$ 0.97	35.02 b $\pm$ 1.48	1.13 bc $\pm$ 0.09	7.3 a $\pm$ 1.4	158.8 c $\pm$ 13.1	7.1 abc $\pm$ 0.9	76.1 ab $\pm$ 3.6	214.2 bcd $\pm$ 27.5
N1	0	8:1	8.55 abcd $\pm$ 0.32	6.56 abc $\pm$ 0.54	26.11 ab $\pm$ 2.88	2.21 de $\pm$ 0.13	48.2 ab $\pm$ 15.0	93.1 abcd $\pm$ 16.0	4.3 ab $\pm$ 0.4	47.4 a $\pm$ 4.0	174.9 abc $\pm$ 26.1
Prz	0	8:1	9.97 c $\pm$ 0.51	4.64 ab $\pm$ 0.67	27.91 ab $\pm$ 1.68	3.81 fg $\pm$ 0.45	47.7 abc $\pm$ 5.5	82.0 abcd $\pm$ 11.8	5.7 abc $\pm$ 0.6	52.0 ab $\pm$ 3.2	120.2 ab $\pm$ 7.3
Chw	5	1:1	2.09 a $\pm$ 0.11	11.62 e $\pm$ 0.77	34.15 b $\pm$ 1.66	0.30 a $\pm$ 0.01	729.9 abc $\pm$ 155.2	126.5 bcd $\pm$ 9.7	10.6 c $\pm$ 1.8	88.0 b $\pm$ 6.7	332.3 d $\pm$ 30.7
N1	5	1:1	3.44 abd $\pm$ 0.35	6.97 abc $\pm$ 0.37	23.43 ab $\pm$ 0.61	0.82 b $\pm$ 0.06	719.3 abc $\pm$ 74.3	43.1 ab $\pm$ 3.3	5.5 abc $\pm$ 0.2	53.1 ab $\pm$ 3.3	178.1 abc $\pm$ 14.1
Prz	5	1:1	5.26 abcd $\pm$ 0.46	4.80 ab $\pm$ 0.35	21.43 a $\pm$ 0.30	1.83 d $\pm$ 0.08	421.7 abc $\pm$ 13.8	35.6 a $\pm$ 1.4	6.2 abc $\pm$ 0.7	71.0 ab $\pm$ 9.3	144.5 abc $\pm$ 18.1
Chw	5	8:1	6.74 abcd $\pm$ 0.48	11.52 e $\pm$ 0.71	30.08 ab $\pm$ 0.58	0.99 bc $\pm$ 0.09	628.0 abc $\pm$ 33.1	141.9 d $\pm$ 8.4	6.2 abc $\pm$ 0.3	74.4 ab $\pm$ 2.8	249.8 cd $\pm$ 10.9
N1	5	8:1	9.57 c $\pm$ 0.75	6.71 abc $\pm$ 0.82	25.46 ab $\pm$ 1.90	2.45 def $\pm$ 0.15	675.2 abc $\pm$ 65.1	82.6 abcd $\pm$ 12.6	4.4 ab $\pm$ 0.5	51.8 ab $\pm$ 4.2	191.6 abcd $\pm$ 27.5
Prz	5	8:1	9.17 bc $\pm$ 0.37	3.98 a $\pm$ 0.22	27.53 ab $\pm$ 1.31	3.88 g $\pm$ 0.23	620.0 abc $\pm$ 20.6	68.1 abcd $\pm$ 4.3	4.0 a $\pm$ 0.1	51.3 ab $\pm$ 5.2	117.4 a $\pm$ 13.5

Populacja	Pożywka		Mg	Ca	K	Mg/Ca	Ni	Mn	Cu	Zn	Fe
	Ni mg dm <sup>-3</sup>	Mg/Ca mol/mol	g kg <sup>-1</sup> s.m.			mol/mol	mg kg <sup>-1</sup> s.m.				
Chw	10	1:1	n.o.	n.o.	no.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.
N1	10	1:1	4.98 abcd ± 0.47	10.43 cde ± 1.34	27.16 ab ± 1.68	0.82 b ± 0.09	700.4 abc ± 275.3	54.2 abcd ± 5.7	7.1 abc ± 1.4	64.1 ab ± 10.6	251.4 bcd ± 48.7
Prz	10	1:1	6.46 abcd ± 1.19	6.26 abcd ± 0.55	22.13 ab ± 1.55	1.74 cd ± 0.36	889.7 abc ± 152.5	42.8 abd ± 3.8	8.9 bc ± 1.0	78.1 ab ± 3.7	193.4 abcd ± 28.2
Chw	10	8:1	5.32 abcd ± 0.54	9.85 cde ± 1.18	32.69 ab ± 2.05	0.95 b ± 0.14	1052.1 c ± 101.6	106.1 abcd ± 11.0	5.7 abc ± 0.7	66.9 ab ± 6.3	248.9 cd ± 30.3
N1	10	8:1	8.49 abcd ± 0.16	6.92 abcd ± 0.33	26.49 ab ± 1.17	2.06 de ± 0.08	1121.8 c ± 53.7	68.7 abcd ± 6.5	4.2 ab ± 0.1	46.9 a ± 2.2	180.3 abcd ± 15.3
Prz	10	8:1	9.86 cd ± 1.07	5.05 ab ± 0.52	29.68 ab ± 2.05	3.25 efg ± 0.08	899.7 bc ± 64.2	53.4 abcd ± 3.6	5.4 abc ± 0.4	71.2 ab ± 4.4	190.8 abcd ± 34.9
Parametry zastosowanych testów statystycznych			T. Kruskala-Wallis  H = 62.5 p≤0.01	T. Tukeya  Błąd:MS międzygr.= 2.40 df=57	T. Kruskala-Wallis  H = 45.1 p≤0.01	T. Tukeya  Błąd: MS międzygr.= 0.01 df=57	T. Kruskala-Wallis  H = 63.2 p≤0.01	T. Kruskala-Wallis  H = 58.7 p≤0.01	T. Kruskala-Wallis  H = 48.1 p≤0.01	T. Kruskala-Wallis  H = 47.4 p≤0.01	T. Tukeya  Błąd: MS międzygr. = 0.012 df=57

Najwyższe wartości stosunku Mg/Ca występowały u osobników wilczomlecz z Przemysłowa. Nie wykazano wpływu pochodzenia populacji na pobieranie niklu u wilczomlecz sosnki przy różnych koncentracjach niklu oraz magnezu w pożywce.

### 5.3.1.2 Wzrost i skład pierwiastkowy przytulii właściwej *Galium verum*

Na rysunkach 28–29 przedstawiono wyniki doświadczenia w kulturach wodnych z przytulią właściwą.

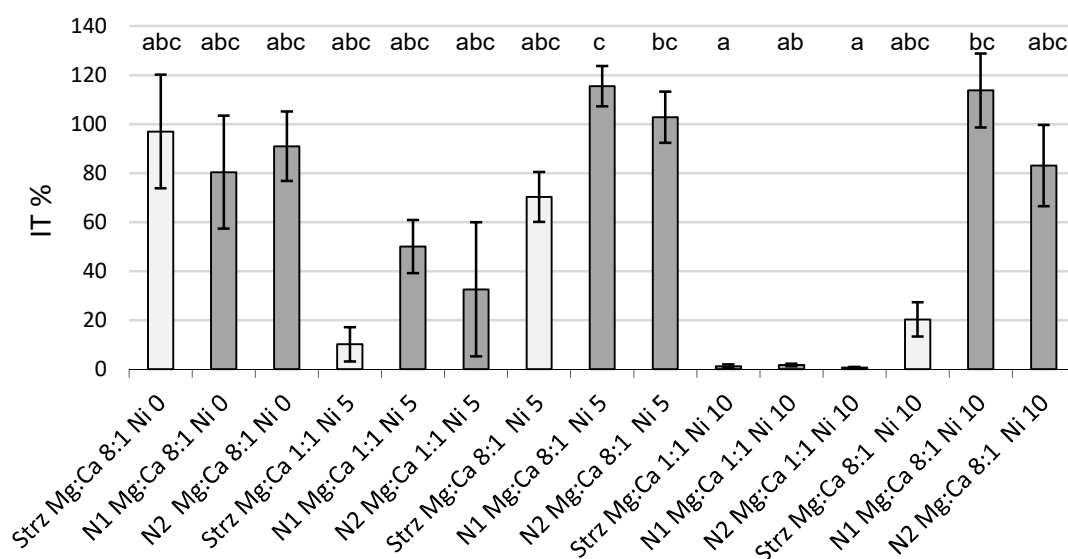


Rys. 28. Przyrost głównego korzenia (a) oraz pędu (b) *G. verum* po ekspozycji na różne koncentracje Ni (0, 5, 10 mg dm<sup>-3</sup>) przy zróżnicowanym stosunku Mg/Ca (1:1 i 8:1) w pożywce w populacjach z granitów (Strz – zaznaczono jasnoszarym kolorem) i serpentynitów (N1, N2). Podano średnie ±SE. Warianty doświadczenia oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie (Test Kruskala Wallisa dla korzeni: H=60.2; p≤0.01, dla pędów: H=57.4; p≤0.01)

Żadna z badanych populacji nie wykazała istotnej statystycznie reakcji na wzrost stosunku Mg/Ca w wariacie bez dodatku niklu. W toku doświadczenia nie odnotowano istotnych różnic w przyroście korzeni u osobników *G. verum*, pochodzących z różnych populacji w obrębie każdego z wariantów doświadczenia (rys. 28A). Stężenie niklu na poziomie  $10 \text{ mg dm}^{-3}$  całkowicie zahamowało wzrost korzeni u wszystkich trzech badanych populacji przytulii właściwej. Rosnące koncentracje magnezu w pożywce obniżały toksyczność niklu. Efekt ten zaznacza się w wypadku wszystkich badanych populacji, jednak nie osiąga poziomu istotności statystycznej.

Podobne tendencje odnotowano dla przyrostu pędów *Galium verum*. Zarówno w obu populacjach serpentynitowych jak i granitowej nastąpiło zahamowanie wzrostu pędów w wariantach z dodatkiem niklu (rys. 28B). Analogicznie jak w przypadku przyrostu korzeni przewaga magnezu nad wapniem niwelowała negatywny wpływ niklu na rośliny, jednak różnice nie uzyskały istotności statystycznej.

Na rysunku 29 przedstawiono wartości indeksu tolerancji (IT) badanych populacji przytulii właściwej na różne stężenia niklu w pożywce przy zróżnicowanych wartościach stosunku Mg/Ca.



Rys. 29. Indeks tolerancji (IT) liczony jako stosunek średniej długości korzenia głównego do długości korzeni z wariantu kontrolnego (Mg/Ca 1:1, bez dodatku Ni) po ekspozycji na 5 i  $10 \text{ mg Ni dm}^{-3}$  przy różnych wartościach stosunku Mg/Ca (1:1 i 8:1) w pożywce w populacjach *Galium verum* z granitów (Strz – zaznaczono jasnoszarym kolorem) i serpentynitów (N1, N2). Podano średnie  $\pm$ SE. Warianty doświadczenia oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie (test Kruskala-Wallis  $H=54.0$ ;  $p \leq 0.01$ )

Nie zaobserwowano statystycznie istotnych różnic w tolerancji na stężenie niklu u populacji *Galium verum* z serpentynitów w stosunku do pochodzącej z granitów. Należy jednak zauważyć, że wartości IT dla populacji serpentynitowych przewyższały kilkukrotnie te dla roślin pochodzących z granitów w obrębie wszystkich wariantów z dodatkiem niklu, za wyjątkiem 10 mg Ni dm<sup>-3</sup> ze zrównoważonym stosunkiem Mg/Ca. Stwierdzono korzystny wpływ obecności niklu w dawce 5 mg Ni dm<sup>-3</sup> w pożywce przy rosnących zawartościach magnezu na obie populacje serpentynitowe. Ponadto u populacji N1 również wyższa dawka niklu działała stymulująco na przyrost korzeni, co wyraża się przez wartość IT przekraczającą 100%.

Po zakończeniu doświadczenia materiał roślinny poddano analizom składu chemicznego. Wyniki tych analiz przedstawiono w tabeli 22. Nie wykazano różnic w pobieraniu większości pierwiastków przez populacje *G. verum*, pochodzące z odmiennych podłoży geologicznych. W odróżnieniu od *E. cyparissias* populacje serpentynitowe i pochodząca z granitu nie różniły się pobieraniem magnezu i wapnia zarówno rozpatrywanymi osobno, jak i wyrażonym stosunkiem Mg/Ca. Wszystkie populacje pobierały zbliżone ilości niklu. Były one niższe w porównaniu z *Euphorbia cyparissias*, zwłaszcza w wariacie z 10 mg Ni dm<sup>-3</sup>. Podobnie jak w wypadku wilczomleczka sosnki nie stwierdzono wpływu zmiennych wartości stosunku Mg/Ca i dawek niklu na pobieranie innych analizowanych pierwiastków.

Brak danych w przypadku osobników populacji z granitów już przy 5 mg Ni dm<sup>-3</sup> w pożywce przy niższym stosunku Mg/Ca wynikał z braku wystarczającej ilości materiału do analiz wskutek słabego przyrostu biomasy oraz wymierania roślin w trakcie trwania doświadczenia. Dawka 10 mg Ni dm<sup>-3</sup> przy stosunku Mg/Ca 1:1 okazała się śmiertelna przed zakończeniem doświadczenia dla osobników wszystkich badanych populacji, choć różniły się one długością życia. Siewki z granitów ze Strzelina przeżywały średnio 26 dni, z serpentynitów z Nasławic (N1) prawie dwa dni dłużej, natomiast populacja N2 około 39 dni. Zaobserwowano korzystne oddziaływanie przewagi magnezu nad wapniem w pożywce (Mg/Ca 8:1). Dzięki temu rośliny z populacji granitowej po ekspozycji na 5 mg Ni dm<sup>-3</sup> tworzyły więcej biomasy oraz dłużej przeżywały, w porównaniu do wariantu 1:1 Mg/Ca. W przypadku wszystkich badanych populacji wyższy stosunek Mg/Ca łagodził działanie wyższych stężeń niklu, co z kolei wpływało na długość życia siewek, zachowujących żywotność nawet do końca trwania doświadczenia.

Tabela 22. Skład pierwiastkowy *Galium verum* właściwej pochodzącej z granitów (Strz) oraz serpentynitów (N1, N2) uprawianej w kulturach wodnych przy różnych wartościach stosunku Mg/Ca oraz stężeniach niklu. Podano średnie  $\pm$ SE; średnie oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie; n.o. – nie oznaczano

Populacja	Pożywka		Mg	Ca	K	Mg/Ca	Ni	Mn	Cu	Zn	Fe
	Ni mg dm <sup>-3</sup>	Mg/Ca mol/mol	g kg <sup>-1</sup>			mol/mol	mg kg <sup>-1</sup>				
Strz	0	1:1	1.72 a $\pm$ 0.22	4.05 ab $\pm$ 1.11	35.05 a $\pm$ 0.79	0.74 ab $\pm$ 0.11	0.07 ab $\pm$ 0.07	99.6 a $\pm$ 23.5	5.33 a $\pm$ 0.01	47.56 a $\pm$ 2.54	101.0 a $\pm$ 2.7
N1	0	1:1	2.27 a $\pm$ 0.21	6.27 b $\pm$ 1.07	48.22 a $\pm$ 6.67	0.64 a $\pm$ 0.07	0.01 a	173.2 a $\pm$ 38.5	9.13 a $\pm$ 1.54	91.75 a $\pm$ 21.77	198.5 a $\pm$ 53.7
N2	0	1:1	1.66 a $\pm$ 0.14	5.29 ab $\pm$ 1.53	45.10 a $\pm$ 8.76	0.58 ab $\pm$ 0.21	0.01 ab	139.4 a $\pm$ 29.1	8.04 a $\pm$ 1.41	73.07 a $\pm$ 0.12	176.5 a $\pm$ 59.1
Strz	0	8:1	6.23 a $\pm$ 0.34	3.27 ab $\pm$ 0.18	38.16 a $\pm$ 3.94	3.18 ab $\pm$ 0.06	0.65 ab $\pm$ 0.19	89.2 a $\pm$ 7.7	5.25 a $\pm$ 0.36	50.74 a $\pm$ 4.31	108.2 a $\pm$ 9.9
N1	0	8:1	8.06 a $\pm$ 0.07	4.65 ab $\pm$ 0.74	40.64 a $\pm$ 5.37	2.96 ab $\pm$ 0.45	2.39 ab $\pm$ 0.10	131.7 a $\pm$ 33.2	7.99 a $\pm$ 1.32	63.75 a $\pm$ 9.85	142.4 a $\pm$ 19.8
N2	0	8:1	6.42 a $\pm$ 0.23	3.47 ab $\pm$ 0.35	36.85 a $\pm$ 2.14	3.15 ab $\pm$ 0.25	1.16 ab $\pm$ 0.52	114.9 a $\pm$ 11.7	6.81 a $\pm$ 1.06	51.48 a $\pm$ 6.15	122.8 a $\pm$ 16.3
Strz	5	1:1	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.
N1	5	1:1	1.79 a $\pm$ 0.35	4.79 ab $\pm$ 0.45	59.12 a $\pm$ 3.57	0.61 ab $\pm$ 0.07	633.67 ab $\pm$ 49.50	138.7 a $\pm$ 13.8	6.92 a $\pm$ 0.99	90.41 a $\pm$ 8.28	110.6 a $\pm$ 5.1
N2	5	1:1	2.25 a	4.61 ab	45.25 a	0.81 ab	660.32 ab	136.0 a	4.05 a	83.81 a	126.3 a
Strz	5	8:1	5.46 a $\pm$ 0.25	2.31 a $\pm$ 0.10	41.83 a $\pm$ 2.41	3.95 b $\pm$ 0.07	297.98 ab $\pm$ 11.93	70.1 a $\pm$ 4.2	5.53 a $\pm$ 1.10	56.71 a $\pm$ 7.77	93.0 a $\pm$ 7.6
N1	5	8:1	6.01 a $\pm$ 0.18	2.47 a $\pm$ 0.16	38.07 a $\pm$ 3.06	4.13 b $\pm$ 0.39	347.37 ab $\pm$ 27.19	76.4 a $\pm$ 3.7	6.86 a $\pm$ 0.93	56.11 a $\pm$ 4.91	106.9 a $\pm$ 3.7
N2	5	8:1	5.76 a $\pm$ 0.35	2.84 ab $\pm$ 0.21	52.10 a $\pm$ 5.27	3.40 ab $\pm$ 0.16	324.54 ab $\pm$ 15.93	90.7 a $\pm$ 6.6	8.28 a $\pm$ 0.34	68.39 a $\pm$ 3.13	130.2 a $\pm$ 13.0

Populacja	Pożywka		Mg	Ca	K	Mg/Ca	Ni	Mn	Cu	Zn	Fe
	Ni mg dm <sup>-3</sup>	Mg/Ca mol/mol	g kg <sup>-1</sup>			mol/mol	mg kg <sup>-1</sup>				
Strz	10	1:1	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.
N1	10	1:1	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.
N2	10	1:1	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.
Strz	10	8:1	7.36 a	4.14 ab	72.97 a	2.97 ab	819.69 ab	112.4 a	7.49 a	98.26 a	122.6 a
N1	10	8:1	6.14 a ± 0.36	2.81 ab ± 0.25	50.74 a ± 3.27	3.73 ab ± 0.41	739.77 b ± 43.34	97.4 a ± 8.7	7.44 a ± 0.75	86.57 a ± 5.26	98.9 a ± 10.5
N2	10	8:1	6.29 a ± 0.27	3.29 ab ± 0.23	48.10 a ± 7.37	3.21 ab ± 0.16	831.88 b ± 46.67	106.7 a ± 14.0	7.31 a ± 1.12	72.10 a ± 10.86	114.4 a ± 6.4
Test Kruskala-Wallis			H=33.6 p=0.001	H=32.4 p=0.002	H=21.6 p=0.063	H=34.6 p=0.001	H=41.1 p≤0.001	H=26.3 p=0.016	H=17.5 p=0.179	H=28.0 p=0.009	H=19.5 p=0.109

### 5.3.2 Wzrost i pobieranie składników mineralnych przez rośliny uprawiane na glebach serpentynitowej i granitowej

W celu zbadania reakcji roślin pochodzących z kontrastowo odmiennych podłoży na specyficzne właściwości gleb serpentynitowych przeprowadzono doświadczenie szklarniowe z wilczomlecem sosnką *Euphorbia cyparissias* oraz przytulią właściwą *Galium verum*. Uprawiano po trzy populacje z każdego gatunku – dwie serpentynitowe oraz jedną granitową. Rośliny rosły na podłożach granitowym oraz serpentynitowym. Ponieważ w doświadczeniu użyto siewek przytulii i ukorzenionych odcinków pędów wilczomlecza, za kryterium wzrostu przyjęto przyrost długości pędu od umieszczenia roślin w podłożu do zakończenia doświadczenia. Właściwości fizyko-chemiczne użytych gleb przedstawiono w rozdziale 4.2.2 (tab. 3). Na rysunkach 30–31 przedstawiono wyniki tego doświadczenia. Wszystkie dane zostały poddane transformacji logarytmicznej  $\ln+1$ . Niektóre z analizowanych zmiennych, nawet po zastosowanych transformacjach, nie spełniły założeń analizy wariancji i w tych przypadkach średnie były porównywane testem *post-hoc* po nieparametrycznej analizie Kruskala-Wallisa, w pozostałych przypadkach zastosowano test HSD Tukeya. Dotyczy to porównania średnich między trzema badanymi populacjami w obrębie tego samego podłoża. Średnie dla tej samej populacji rosnącej na dwóch użytych w doświadczeniu glebach były porównywane parami testem t-Studenta lub U Manna-Whitneya w wypadku braku normalności rozkładu. Szczegóły dotyczące parametrów wykonanych testów statystycznych zamieszczono w załączniku do pracy (por. rozdz. 10.4).

#### 5.3.2.1 Wzrost i skład pierwiastkowy *Euphorbia cyparissias*

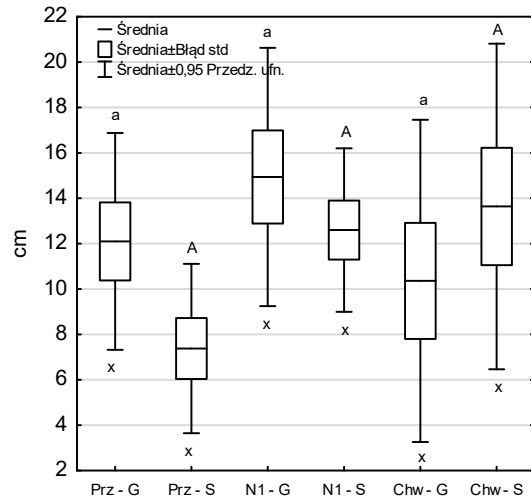
Nie stwierdzono statystycznie istotnych różnic przyrostu pędu w czasie trwania doświadczenia, a także wytworzonej suchej masy pędów oraz korzeni (rys. 30A i C) wszystkich badanych populacji, zarówno rosnących na tej samej glebie jak i w obrębie odmiennych podłoży. Wykazano natomiast istotną różnicę wielkości biomasy pędów pomiędzy populacjami serpentynitowymi uprawianymi na podłożu serpentynitowym (rys. 30B). Populacja z Nasławic (N1) kumulowała dwa i pół razy więcej suchej masy niż ta z Przemysłowa (Prz), podczas gdy populacja granitowa (Chw) nie różniła się od żadnej z nich.

Analizy składu pierwiastkowego wykazały istotnie wyższe zawartości magnezu (rys. 30D) u wszystkich populacji wilczomlecza sosnki z podłoża serpentynitowego w

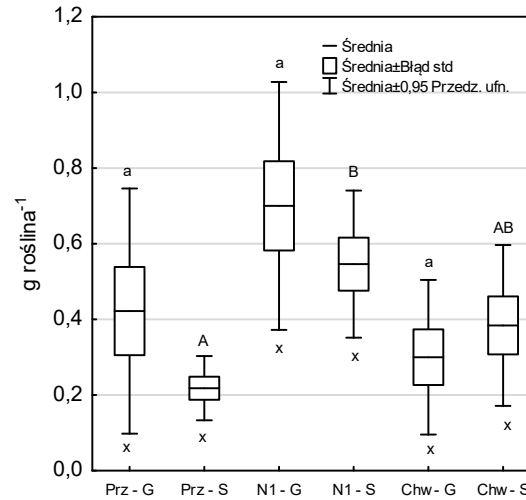


porównaniu do granitowego. Zauważono także różnicę w kumulowaniu tego makroelementu pomiędzy populacją N1 a Chw, rosnących na glebie serpentynitowej, z których pierwsza kumulowała go o 16% więcej. W przypadku zawartości wapnia rośliny populacji N1 i Chw kumulowały więcej tego pierwiastka, rosnąc na glebie granitowej w stosunku do serpentynitowej (rys. 30E). Nie stwierdzono różnic w pobieraniu potasu (rys. 30F) przez wilczomlecze bez względu na populację oraz rodzaj podłoża. Wykazano istotnie wyższe zawartości niklu (rys. 30G) we wszystkich badanych populacjach rosnących na glebie serpentynitowej. Ponadto, porównując populacje, okazało się, że jedna z serpentynitowych (N1) kumulowała istotnie mniej niklu niż pozostałe Prz i Chw w uprawie na serpentynicie. Ze względu na śladowe zawartości chromu w nadziemnych częściach wilczomlecza sosnki nie zamieszczano wykresu z danymi. Dotyczyło to trzech badanych populacji rosnących na obu typach podłoża. Wszystkie populacje *E. cyparissias* z podłoża granitowego pobierały istotnie więcej manganu (rys. 30H) od około dwóch do ponad trzech razy więcej, podobną zależność odnotowano w przypadku cynku (rys. 30K). Różnica koncentracji tego metalu u populacji granitowej była największa i aż ponad czterokrotna. Na podłożu serpentynitowym wykazano także istotne statystycznie różnice zawartości cynku między populacjami z Przemysłowa (Prz) a N1 i Chw. Pierwsza z nich kumulowała o 14% mniej cynku, druga natomiast mniej o 70%. Nie stwierdzono różnic w pobieraniu kobaltu (rys. 30I) oraz miedzi (rys. 30J) przez rośliny w żadnym z wariantów doświadczenia. W przypadku żelaza u obu populacji serpentynitowych stwierdzono jego wyższe koncentracje po uprawie w glebie serpentynitowej (rys. 30L) w stosunku do granitowej. Ponadto, zaobserwowano, że populacja z Przemysłowa kumulowała istotnie więcej żelaza niż N1 i Chw z tego samego typu podłoża, o ponad półtora razy więcej u obu populacji.

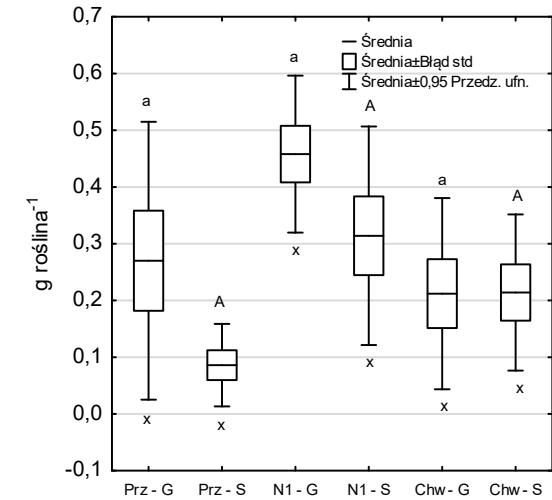
**A) Przyrost pędu *E. cyparissias***



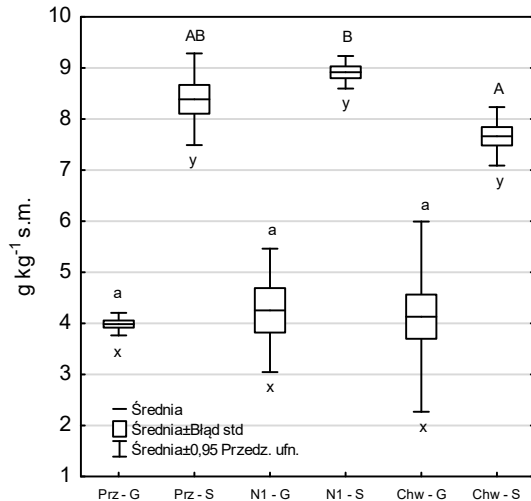
**B) Sucha masa pędów *E. cyparissias***



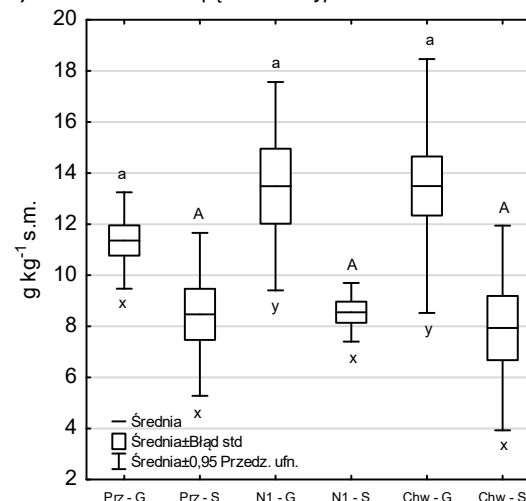
**C) Sucha masa korzeni *E. cyparissias***



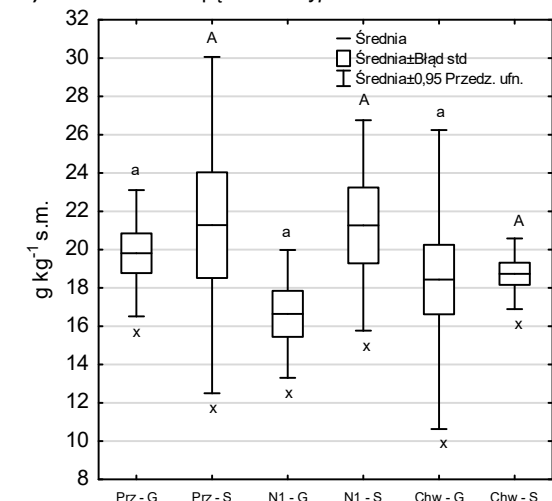
**D) Zawartość Mg w pędach *E. cyparissias***



**E) Zawartość Ca w pędach *E. cyparissias***

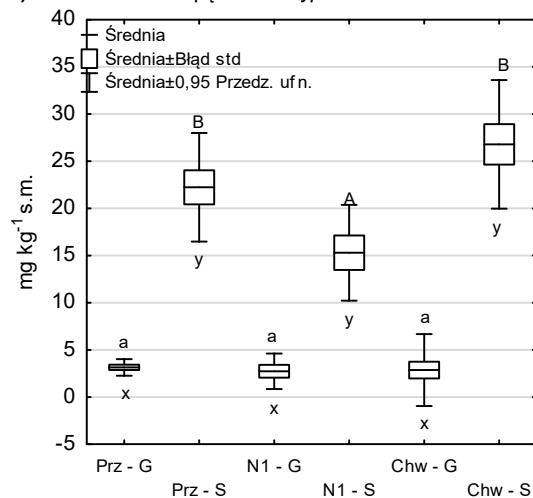


**F) Zawartość K w pędach *E. cyparissias***

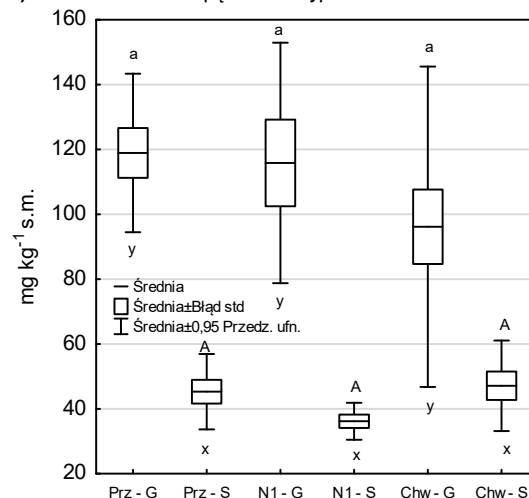


Rys. 30. Przyrost długości pędów (A), sucha masa pędów (B), sucha masa korzeni (C), oraz zawartości pierwiastków (D-L) w populacjach *E. cyparissias* z granitów (Chw) i serpentynitów (Prz, N1) uprawianych na glebach granitowej (G) oraz serpentynitowej (S). Słupki oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie, małe litery a i b dotyczą różnic między populacjami rosnącymi na glebie granitowej, wielkie litery A i B – na glebie serpentynitowej, litery x i y dotyczą każdej populacji osobno, porównywanej pomiędzy obiema glebami

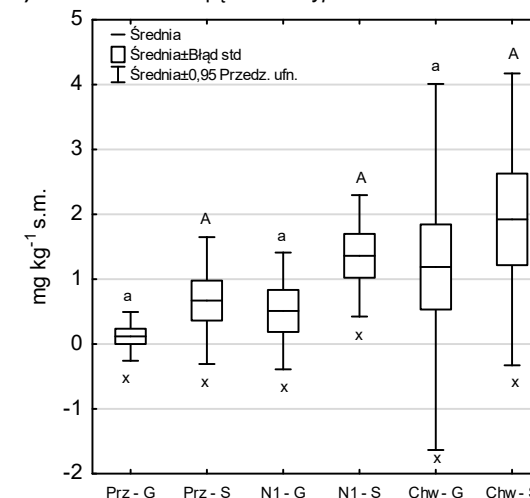
G) Zawartość Ni w pędach *E.cyparissias*



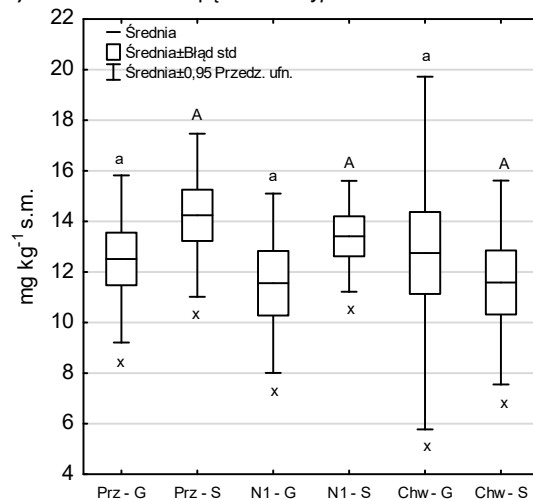
H) Zawartość Mn w pędach *E.cyparissias*



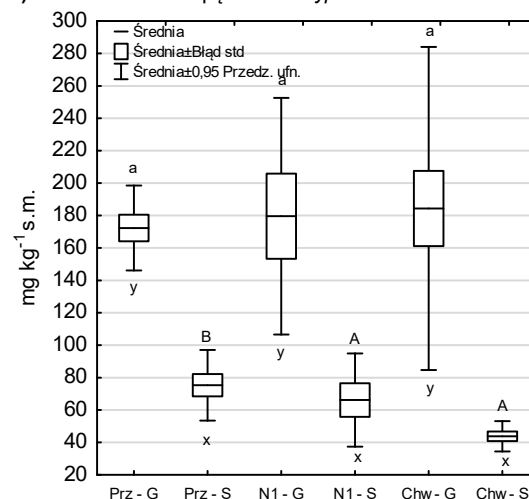
I) Zawartość Co w pędach *E.cyparissias*



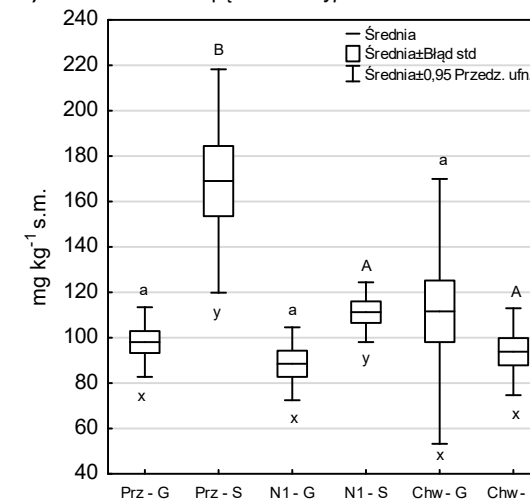
J) Zawartość Cu w pędach *E. cyparissias*



K) Zawartość Zn w pędach *E. cyparissias*



L) Zawartość Fe w pędach *E. cyparissias*



Rys. 30 cd. Przyrost długości pędów (A), sucha masa pędów (B), sucha masa korzeni (C), oraz zawartości pierwiastków (D-L) w populacjach *E. cyparissias* z granitów (Chw) i serpentynitów (Prz, N1) uprawianych na glebach granitowej (G) oraz serpentynitowej (S). Słupki oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie, małe litery a i b dotyczą różnic między populacjami rosnącymi na glebie granitowej, wielkie litery A i B – na glebie serpentynitowej, litery x i y dotyczą każdej populacji osobno, porównywanej pomiędzy obiema glebami

### 5.3.2.2 Wzrost i skład pierwiastkowy *Galium verum*

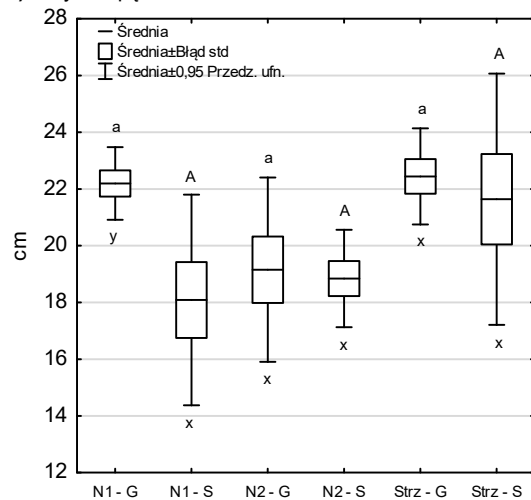
Pędy przytulii właściwej z populacji N1 wykazywały większy przyrost w czasie trwania doświadczenia, rosnąc na glebie granitowej niż na serpentynitowej (rys. 31A). Nie stwierdzono natomiast różnic między badanymi populacjami rosnącymi na tym samym typie podłoża. Biomasa pędów roślin populacji N2 była wyższa w przypadku uprawy na podłożu serpentynitowym (rys. 31B), biomasa korzeni również (rys. 31C), ale jedynie w stosunku do populacji granitowej na glebie serpentynitowej. Ta druga wytworzyła istotnie więcej masy korzeni w uprawie na rodzimym podłożu.

Skład chemiczny przytulii właściwej oddawał własności gleb serpentynitowej oraz granitowej pod względem wysokich koncentracji pierwiastków charakterystycznych, takich jak magnez, nikiel, cynk lub mangan. Stwierdzono istotnie wyższe koncentracje magnezu (rys. 31D) we wszystkich badanych populacjach, rosnących na podłożu serpentynitowym. Odnotowano również, że osobniki populacji granitowej, rosnące na glebie z granitu kumulowały więcej magnezu niż obie populacje serpentynitowe. Również uprawa na podłożu granitowym skutkowała wyższymi koncentracjami wapnia (rys. 31E), we wszystkich populacjach przytulii, w porównaniu do roślin z gleby serpentynitowej. Odnotowano także różnice między populacjami z odmiennych podłoży: rośliny populacji N2 kumulowały istotnie więcej wapnia niż granitowej, rosnąc na podłożu granitowym. Analogicznie, na glebie serpentynitowej obie populacje serpentynitowe pobierały istotnie więcej tego pierwiastka niż populacja granitowa. Typ podłoża wpływał na zawartości potasu w populacjach N1 i N2 (rys. 31F): na glebie z serpentynitu kumulowały istotnie więcej potasu niż na glebie wytworzonej na granicie. Ponadto zaobserwowano, że populacja granitowa na glebie granitowej pobierała istotnie więcej tego pierwiastka niż populacja N2, a na glebie serpentynitowej – odwrotnie – tym razem populacja N1 kumulowała istotnie więcej niż populacja granitowa. Stwierdzono istotnie wyższe zawartości niklu (rys. 31G) na glebie serpentynitowej we wszystkich badanych populacjach *G. verum*. Brak było różnic w pobieraniu tego metalu między populacjami różnego pochodzenia w obrębie tego samego podłoża. W przypadku chromu populacje serpentynitowe N1 i N2 kumulowały go istotnie więcej na serpentynicie (rys. 31H). Nie zaobserwowano takiej reakcji u populacji granitowej. Z kolei na glebach granitowych w porównaniu do podłoża serpentynitowego wszystkie populacje pobierały od dwóch do trzech razy więcej manganu (rys. 31I) oraz czterech i pół krotnie więcej cynku (rys. 31L) w przypadku obu populacji serpentynitowych, i ponad pięciokrotnie więcej cynku w przypadku granitowej. Co więcej, w uprawie na

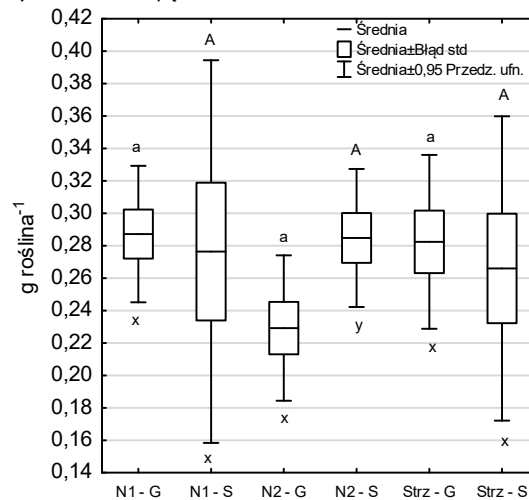
podłożu serpentynitowym stwierdzono istotnie wyższe zawartości obu metali w populacjach N1 i N2 w stosunku do populacji granitowej. Zaobserwowano niższe zawartości kobaltu (rys. 31J) u populacji N2 rosnącej na glebie granitowej w porównaniu do serpentynitowej. Różnice ujawniły się także pomiędzy populacjami z podłoża granitowego, również tutaj populacja N2 miała istotnie niższą zawartość kobaltu w porównaniu do dwóch pozostałych (N1 i Strz). Wykazano różnice pomiędzy zawartością miedzi (rys. 31K) u populacji N2 i Strz, uprawianych na serpentynicie. Populacja granitowa (Strz) kumulowała o około 24% mniej tego metalu niż serpentynitowa.

W toku doświadczenia wykazano, że wilczomlecze sosnka kumulowało więcej magnezu oraz niklu niż przytulia właściwa. Zakres koncentracji magnezu u wilczomlecza wynosił od około 4 g kg<sup>-1</sup> na glebie granitowej oraz 8–9 g kg<sup>-1</sup> na serpentynitowej, podczas gdy u przytulii było to odpowiednio około 2 g kg<sup>-1</sup> oraz 4.5–5.5 g kg<sup>-1</sup>. W przypadku niklu zaobserwowano podobną zależność. Wilczomlecze pobierało średnio około 3 mg Ni kg<sup>-1</sup> na granicy, przytulia około 1–2 mg kg<sup>-1</sup>, na serpentynicie zaś 15–27 mg Ni kg<sup>-1</sup>, a przytulia 7–8 mg kg<sup>-1</sup>. Z kolei koncentracje wapnia u *Galium verum* we wszystkich badanych populacjach (10.8–18.2 g kg<sup>-1</sup>) były nieco wyższe w stosunku do *E. cyparissias* (7.9–13.5 g kg<sup>-1</sup>). Zawartości chromu u *G. verum* wynosiły do 2 mg kg<sup>-1</sup> na glebie serpentynitowej, podczas gdy u wilczomlecza stwierdzono jedynie jego śladowe ilości. U przytulii wykazano także wyższe koncentracje żelaza, których zawartości nie różniły się istotnie ani pomiędzy badanymi populacjami ani rodzajami gleb. Wykresów nie zamieszczono w tej pracy. Średnie zawartości żelaza u wszystkich populacji mieściły się w przedziale 200–300 mg kg<sup>-1</sup>, u wilczomlecza zaś oscylowały w granicach 100 mg kg<sup>-1</sup> poza jednym wyjątkiem. W przypadku zawartości cynku również stwierdzono tendencje do akumulowania jego większych ilości u osobników przytulii w stosunku do wilczomlecza. Wszystkie badane populacje obu gatunków pobierały istotnie więcej manganu oraz cynku, rosnąc na glebie granitowej oraz magnezu i niklu na serpentynitowej, co było odzwierciedleniem naturalnie wysokich koncentracji tychże pierwiastków w glebach użytych do doświadczenia.

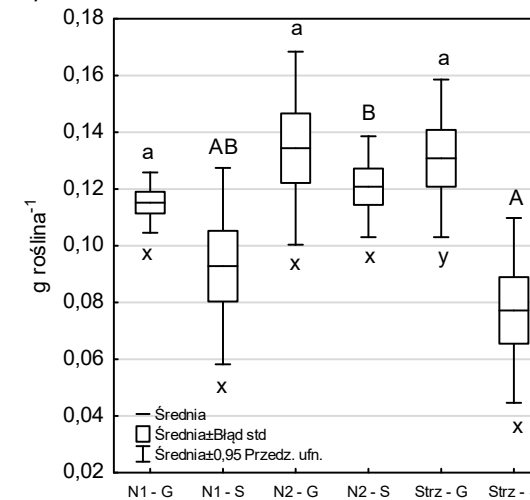
A) Przyrost pędu *G. verum*



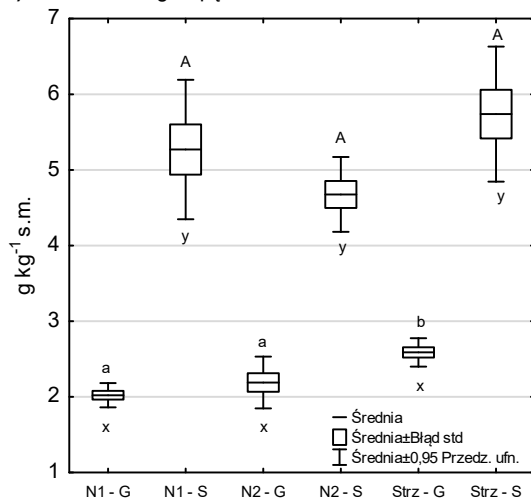
B) Sucha masa pędów *G. verum*



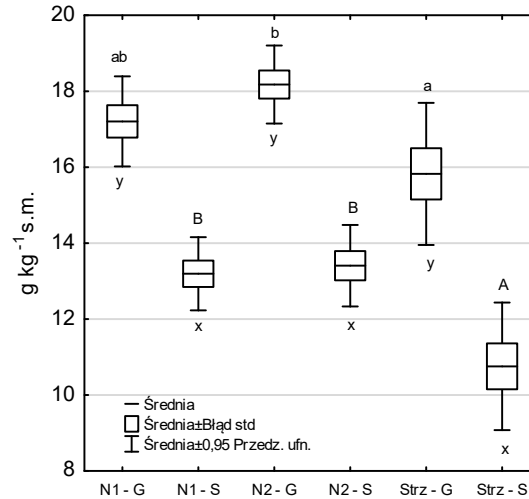
C) Sucha masa korzeni *G. verum*



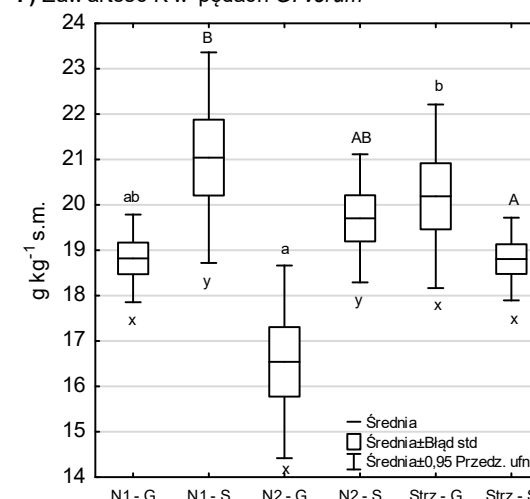
D) Zawartość Mg w pędach *G. verum*



E) Zawartość Ca w pędach *G. verum*

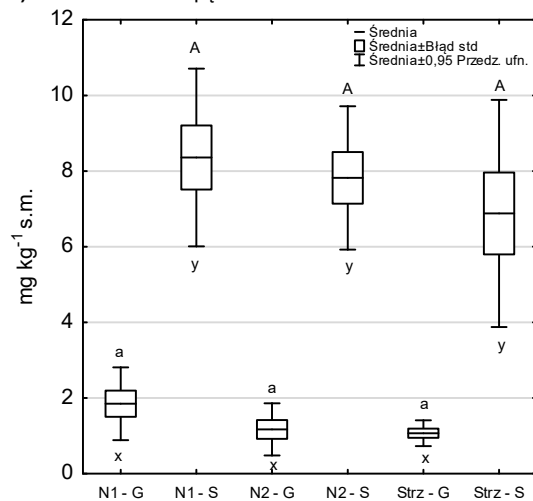


F) Zawartość K w pędach *G. verum*

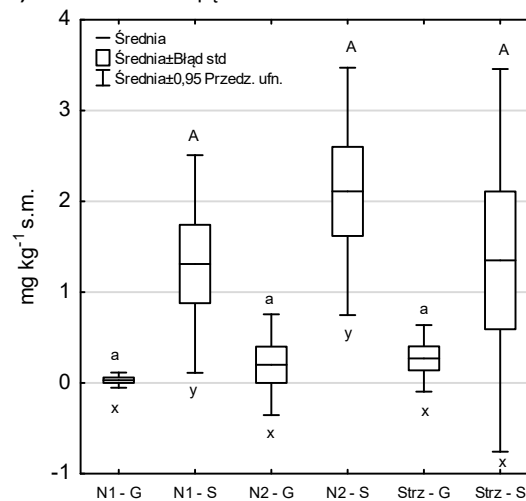


Rys. 31. Przyrost długości pędów (A), sucha masa pędów (B), sucha masa korzeni (C), oraz zawartości pierwiastków (D-L) w populacjach *G. verum* z granitów (Strz) i serpentynitów (N1, N2) uprawianych w glebach granitowej (G) oraz serpentynitowej (S). Słupki oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie, małe litery a i b dotyczą różnic między populacjami rosnącymi na glebie granitowej, wielkie litery A i B – na glebie serpentynitowej, litery x i y dotyczą każdej populacji osobno, porównywanej pomiędzy obiema glebami

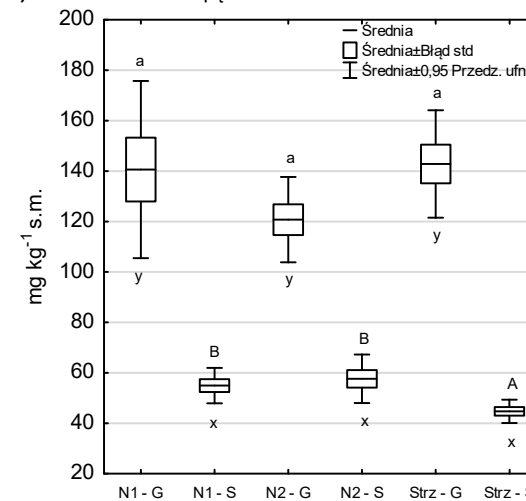
G) Zawartość Ni w pędach *G. verum*



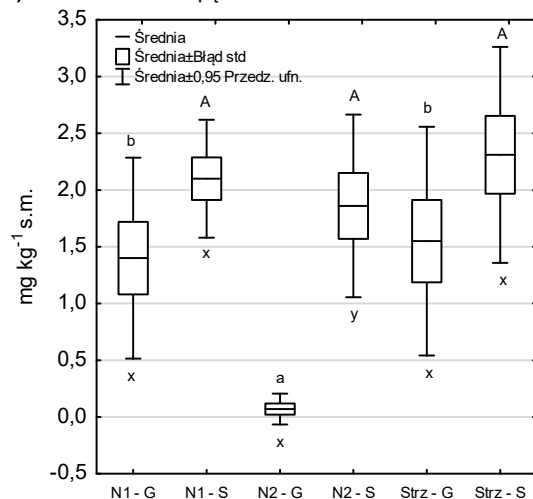
H) Zawartość Cr w pędach *G. verum*



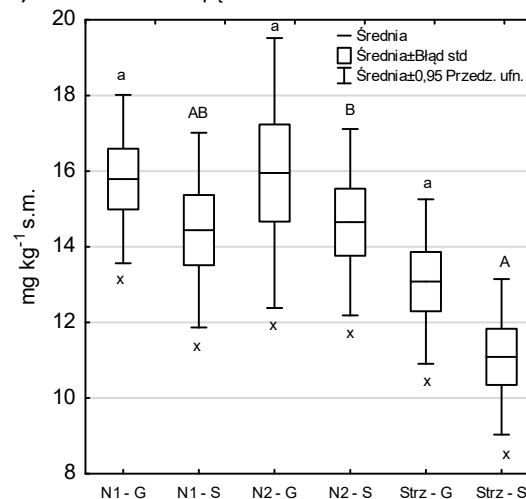
I) Zawartość Mn w pędach *G. verum*



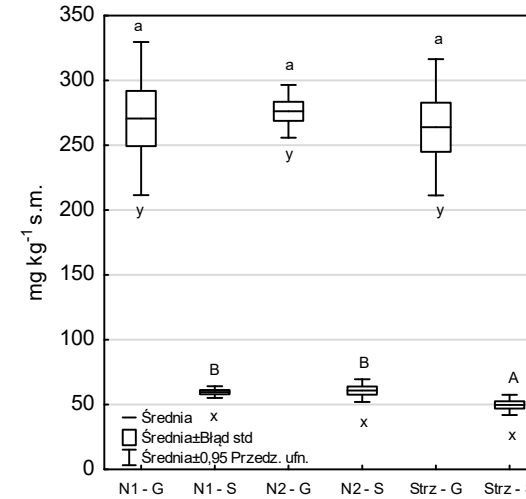
J) Zawartość Co w pędach *G. verum*



K) Zawartość Cu w pędach *G. verum*



L) Zawartość Zn w pędach *G. verum*



Rys. 31. cd. Przyrost długości pędów (A), sucha masa pędów (B), sucha masa korzeni (C), oraz zawartości pierwiastków (D-L) w populacjach *G. verum* z granitów (Strz) i serpentynitów (N1, N2) uprawianych w glebach granitowej (G) oraz serpentynitowej (S). Słupki oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie, małe litery a i b dotyczą różnic między populacjami rosnącymi na glebie granitowej, wielkie litery A i B – na glebie serpentynitowej, litery x i y dotyczą każdej populacji osobno, porównywanej pomiędzy obiema glebami

Podsumowując reakcje badanych populacji obu gatunków na wpływ odmiennych podłoży, na których rosły, można stwierdzić, że nie różniły się pod względem wzrostu, natomiast skład pierwiastkowy pędów odzwierciedlał specyfikę właściwości gleb. Zaznaczyło się to szczególnie wyraźnie w wypadku pierwiastków decydujących o odrębności geochemicznej serpentynitów, tj. magnezu, wapnia, niklu i chromu, przy czym negatywnie zweryfikowano założenia badawcze, zakładające odmienną reakcję populacji z serpentynitów i granitów na czynniki kompleksu serpentynitowego. Potwierdzono natomiast zdolności wilczomleczka sosnki do silnej kumulacji niklu. Gromadził on od dwóch do trzech razy wyższe ilości tego pierwiastka w pędach w porównaniu z *G. verum*, jednak właściwość ta okazała się niespecyficzną dla populacji serpentynitowych. U *E. cyparissias* stwierdzono tylko ślady chromu w pędach wszystkich populacji rosnących na obu rodzajach gleb, podczas gdy u *G. verum* wszystkie populacje gromadziły mierzalne koncentracje tego pierwiastka. W wypadku populacji serpentynitowych przytulii były one istotnie wyższe na podłożu serpentynitowym w porównaniu z granitowym.



## 6. Dyskusja

### 6.1 Właściwości siedlisk

Siedliska serpentynitowe są obiektem zainteresowań wielu badaczy, począwszy od pierwszego udokumentowanego zapisu autorstwa Cesalpino z końca XVI wieku (Proctor i Woodel 1975). Szereg właściwości fizycznych oraz chemicznych gleb serpentynitowych stwarza osobliwe warunki dla zasiedlających je roślin. Gleby te często mają charakter inicjalny, z czym wiąże się ich niska miąższość oraz duży udział frakcji szkieletowych (Walker 1954, Proctor i Woodel 1975). Wśród nietypowych właściwości chemicznych na plan pierwszy wysuwają się wysokie koncentracje magnezu oraz niektórych metali ciężkich, zwłaszcza niklu, chromu oraz kobaltu przy jednocześnie niskiej zasobności w wapń, materię organiczną oraz podstawowe składniki odżywcze (Kruckeberg 1951, Proctor i Woodel 1975, Sasse 1979a, Brooks 1987).

Na podstawie na polskiej klasyfikacji gleb pod kątem ich odczynu (Gonet i in. 2015) stwierdzono, że gleby wykształcone na granitach odznaczały się odczynem kwaśnym lub silnie kwaśnym, wapienne z kolei miały odczyn obojętny lub zasadowy. Gleby serpentynitowe miały odczyn od kwaśnego do obojętnego, co potwierdzają również Kierczak i in. (2016). Ich średnia wartość pH była niższa niż podaje Brooks (1987) dla tego typu gleb (pH 6.8) lub Salihaj i in. (2018) dla gleb Kosowa, natomiast była zbliżona do danych z Bułgarii (Pavlova 2009) oraz Polski, w tym Dolnego Śląska (Żołnierz 2007). W pracy tego autora można zauważyć zróżnicowanie odczynu pomiędzy glebami serpentynitowymi z różnych lokalizacji. Gleby z obszaru Masywu Szklar odznaczały się wyższą zasadowością na tle pozostałych, a ich odczyn był bardzo zbliżony do podanego przez Kierczaka i in. (2007). W niniejszych badaniach także odnotowano rozbieżności odczynu badanych gleb serpentynitowych, z których te z Masywu Szklar wykazywały najbardziej zasadowy odczyn, choć średnia wartość pH była nieco niższa niż podają wspomniani autorzy. Do opisywanych w tej pracy badań wybierano murawy o podobnej fizjonomii i na ile to było możliwe zbliżonym składzie gatunkowym. Reprezentowały one zbliżony stopień zaawansowania sukcesji roślinności, zatem można było oczekiwać, że ich siedliska są na podobnym stopniu rozwoju. Okazało się, że najgłębsze były gleby powierzchni badanych na granitach, a miąższości z serpentynitów i wapieni były mniejsze. W badaniach Żołnierza (2007) gleby serpentynitowe odznaczały się niższą miąższością.

Jak już wspomniano, gleby serpentynitowe są zazwyczaj ubogie w składniki odżywcze, zwłaszcza azot, fosfor i potas (Proctor 1971). W tej pracy, natomiast, formy wymienne fosforu i potasu w glebach serpentynitowych kształtowały się na takim samym poziomie jak w glebach granitowych, a przekraczały ilości z gleb wapiennych. Koncentracje mineralnego azotu były również wyższe niż na odmiennych typach gleb i wpisywały się w zakres podany przez Webera (1981) dla dolnośląskich gleb serpentynitowych. Głównym źródłem azotu w glebie jest materia organiczna (Gonet i in. 2015), która w glebach serpentynitowych występuje zwykle w niewielkich ilościach (Shewry i Peterson 1976). Jest to związane z niską produktywnością tych siedlisk (Whittaker 1954). Mišljenović i in. (2018) odnotowali związek pomiędzy zawartościami materii organicznej i azotu w glebach serpentynitowych na terenach górskich w Serbii, jednocześnie wykazali, że obiekt o najwyższej zawartości materii organicznej i azotu odznaczał się także wysoką produktywnością. W niniejszych badaniach, opierając się na oznaczeniu straty żarowej gleb, wykazano istotnie więcej materii organicznej w glebach serpentynitowych oraz konsekwentnie wyższą zawartość azotu w porównaniu do wapiennych i granitowych. W glebach serpentynitowych Szkocji i Austrii odnotowano półtorakrotnie niższe zawartości materii organicznej (Shewry i Peterson 1976), z kolei dolnośląskie wykazywały zbieżne zawartości z podanymi w tym opracowaniu (Żołnierz 2007). Na podstawie analizy składowych głównych PCA (por. rys. 2) odnotowano również, że zasobność w materię organiczną była dodatnio skorelowana z pojemnością wodną gleb. Wskazuje to pośrednio na zwiększoną produkcję biomasy roślin na stanowiskach o bardziej korzystnych stosunkach wodnych. Niedobór wody, zwłaszcza w siedliskach serpentynitowych odgrywa niebagatelną rolę. Stwierdzono, że susza nasilała toksyczny wpływ gleb serpentynitowych na roślinność (Proctor i Nagy 1993). Ponadto wspomniani autorzy podają suszę jako kluczowy czynnik wpływający na odrębność flory stanowisk ultramaficznych. Tolerancja na suszę u *Cerastium alpinum*, obok odporności na Ni i Mg, uznana została za główny wyznacznik adaptacji do siedlisk serpentynitowych (Nyberg Berglund i in. 2003).

Na skład chemiczny gleb niewątpliwie wpływały właściwości ich skały macierzystej. Analizy składu chemicznego jednoznacznie potwierdziły odmienną kompozycję chemiczną badanych gleb. Gleby serpentynitowe na tle wapiennych oraz granitowych wyróżniały się najwyższymi stężeniami magnezu, żelaza oraz metali ciężkich, zwłaszcza niklu, chromu i kobaltu. Zawartości całkowite magnezu w większości analizowanych prób przekroczyły górną wartość zakresu podanego przez Gonet i in. (2015). W przypadku gleb

serpentytowych należy uwzględnić naturalnie występujące znaczne ilości magnezu wynikające ze składu chemicznego skały macierzystej. Badania Żołnierza (2007) gleb serpentytowych Dolnego Śląska wykazały kilkukrotnie wyższe zawartości całkowite magnezu niż podano w niniejszej rozprawie, a z kolei formy wymienne tego metalu były na zbliżonym poziomie, podobnie jak w pracy Tomović i in. (2018) z serbskich serpentytów. Samecka-Cymerman i in. (2009), tymczasem, odnotowali ponad trzykrotnie wyższe średnie zawartości wymiennych form magnezu w glebach serpentytowych Masywu Ślęży niż w przedstawianej pracy na tym samym obszarze. Salihaj i Bani (2018), badając gleby serpentytowe Kosowa, odnotowali bardzo wysokie zawartości całkowite magnezu, sięgające prawie 200 g kg<sup>-1</sup>, jednak jego dostępność dla roślin była niewspółmiernie niższa i jednocześnie na podobnym poziomie, co w tej pracy. Duża zmienność składu mineralnego gleb pomiędzy masywami serpentytowymi, a nawet pomiędzy stanowiskami w obrębie tego samego masywu, którą odnotował m.in. Żołnierz (2007) w swojej pracy, jest zgodna z wynikami badań obszarów serpentytowych z różnych rejonów Europy i świata (przeglądy: Proctor 1971, Proctor i Wodel 1975, Sasse 1979ab, Brooks 1987).

Wapń łagodzi toksyczny wpływ wysokich stężeń magnezu oraz innych potencjalnie toksycznych składników w glebach serpentytowych, ponadto modyfikuje pH gleby, a to z kolei wpływa na dostępność pierwiastków dla roślin, w tym metali ciężkich (Shewry i Peterson 1976, Brooks 1987). Z powyższych względów, nie tylko niska zasobność gleb serpentytowych w wapń, jako taka, wpływa niekorzystnie na roślinność, ale w połączeniu z wysokimi stężeniami magnezu oraz innych potencjalnie toksycznych pierwiastków, staje się przyczyną wyjątkowo trudnych warunków dla roślin (Brooks 1987, Kruckeberg 1992 za Proctor i Nagy 1993). Niedobór wapnia na glebach serpentytowych rozpatrywany był przez niektórych badaczy jako główny czynnik powodujący nieurodzajność gleb serpentytowych (Kruckeberg 1954). Zawartości wapnia w poziomach próchnicznych gleb kształtuje się w zakresie 1.3–25.2 g kg<sup>-1</sup>, choć w glebach wapiennych jego zawartość jest zdecydowanie wyższa (Gonet i in. 2015), co także wykazano w tej pracy. Gleby granitowe oraz serpentytowe wpisywały się natomiast w podany zakres. Poziom wapnia w glebach serpentytowych jest zazwyczaj bardzo niski (np. Bani i in. 2014), choć nie jest to regułą. Sasse (1979a) przedstawił duże zróżnicowanie pomiędzy glebami serpentytowymi Francji, Włoch i Austrii, w których różnice koncentracji były nawet dziesięciokrotne. Gleby serpentytowe w tej pracy charakteryzowały się stosunkowo wysoką zasobnością w wapń,

niemniej jednak, literatura podaje nawet kilkukrotnie wyższe koncentracje form wymiennych tego pierwiastka, jak na przykład w pracy Tomović i in. (2018).

Przewaga koncentracji magnezu nad wapniem w glebach serpentynitowych prowadzi do zaburzeń równowagi jonowej, wynikającej z niekorzystnych dla rozwoju roślin proporcji molowych między wymienionymi pierwiastkami. W przypadku gleb z serpentynitów Dolnego Śląska stosunek molarny Mg/Ca obliczony na podstawie zawartości wymiennych mieścił się w dość szerokim przedziale od 0.84 do 11.56 (Żołnierz 2004, 2007, Samecka-Cymerman i in. 2009). Wyniki uzyskane w tej pracy zawierają się w dolnych zakresach wartości podawanych przez cytowanych autorów.

Zawartości niklu w glebach wapiennych i granitowych mieściły się w przedziale 1.3–68 mg kg<sup>-1</sup> podawanym przez Kabatę-Pendias i Wiącek (1985 cyt. za Kabata-Pendias i Pendias 2001) dla różnych rodzajów gleb Polski. Cechą charakterystyczną gleb serpentynitowych są naturalnie wysokie koncentracje niklu. Według Kabaty-Pendias i Pendias (2001) mogą one przekraczać nawet 7000 mg kg<sup>-1</sup>. Zgodnie z oczekiwaniami, koncentracje niklu w glebach serpentynitowych wielokrotnie przewyższały te z granitów i wapieni, zarówno pod względem zawartości całkowitych, jak i rozpuszczalnych. Wartości całkowite niklu dochodziły do 4000 mg kg<sup>-1</sup> i były zbieżne z badaniami Żołnierza (1993, 2007). Jak już wspomniano, rodzaj skały macierzystej oraz jej pochodzenie implikuje właściwości gleb na niej wykształconych, a dodatkowo wpływa na mobilność metali (Chardot i in. 2007, Bani i in. 2014, Kierczak i in. 2016). Pula niklu dostępna dla roślin w glebach Masywu Szklar, po ekstrakcji DTPA, stanowiła średnio około 12.5% całkowitej zawartości, natomiast w obrębie Kamiennego Grzbietu jedynie 4.9%. Na to zjawisko zwrócili uwagę Kierczak i in. (2016), którzy prowadzili badania na tych samych obszarach i uzyskali podobne wyniki: 14% i 5.2%, odpowiednio. Autorzy wskazują na znaczenie różnic w stopniu serpentynizacji skał macierzystych, ich składu mineralnego i związanego z tym tempa wietrzenia. Ten sam zespół badawczy nie odnotował natomiast wpływu na dostępność chromu zależnie od typu skały macierzystej. Ogólnie ilość chromu jest szczególnie wysoka w glebach zasadowych oraz pochodzenia wulkanicznego. W serpentynitowych może dochodzić nawet do 4000 mg kg<sup>-1</sup> (Kabata-Pendias i Pendias 2001), jednak nawet relatywnie wysokie stężenia chromu nie stanowią zagrożenia dla roślin ze względu na jego niską dostępność w glebie (Kabata-Pendias i Mukherjee 2007) i zazwyczaj nie przekraczają stężeń toksycznych dla roślin (Brooks 1987). Potwierdzają to m.in. badania Liciny i in. (2010), w których formy wymienne były poniżej granicy wykrywalności

pomimo stosunkowo wysokiej zawartości chromu całkowitego. Najwyższe zawartości całkowite chromu w niniejszej pracy odnotowano w glebach Masywu Szklar. Według Kabaty-Pendias i Pendiasa (1993) gleby wykształcone w tamtym rejonie mogą zawierać do 2500 mg Cr kg<sup>-1</sup>, choć nie wykazano tak wysokich stężeń w badanych próbach. Maksymalne stężenia chromu były niemal identyczne jak u Żołnierza (2007), z kolei u Sujkowskiej-Rybkowskiej i in. (2020) średnie zawartości chromu były siedmiokrotnie niższe. Zawartości chromu w pozostałych typach gleb zgadzały się z zakresem podanym przez Kabatę-Pendias i Mukherjee (2007), który wynosił 7–150 mg kg<sup>-1</sup>, natomiast na granitach w obrębie Masywu Ślęży przekraczały kilkukrotnie wartości 2.2–6.5 mg kg<sup>-1</sup>, podane przez Kubicką i in. (2015).

Kobalt jest metalem związanym ze skałami zasadowymi, dlatego występuje w podwyższonych ilościach na glebach serpentynitowych (Kabata-Pendias i Mukherjee 2007). W tej pracy odnotowano ponad dziesięciokrotnie wyższe jego zawartości na serpentynitach niż w pozostałych typach gleb. Gleby wapienne i granitowe zawierały średnio bardzo podobne ilości kobaltu i mieściły się w przedziale podanym przez Kabatę-Pendias i Pendiasa (1993) dla Polskich gleb lub Goneta i in. (2015). Średnie zawartości całkowite kobaltu na glebach serpentynitowych zbliżone były do danych literaturowych, dotyczących podobnych obszarów (Żołnierz 2007, Sujkowska-Rybkowska i in. 2020), natomiast przewyższały wyniki Kubickiej i in. (2015). Sujkowska-Rybkowska i in. (2020) sugerują, że widoczne różnice pomiędzy zawartością niklu, chromu i kobaltu w glebach z Masywu Szklar w ich badaniach oraz innych autorów, a także duża zmienność pomiędzy próbami wynika ze specyfiki podłoża, które zostało antropogenicznie przekształcone w przeciwieństwie do naturalnych wychodni ultramaficznych o niezakłóconym profilu glebowym.

Niektórzy badacze w zbiorze specyficznych cech siedlisk serpentynitowych ujmują właściwości fizyczne (m.in. przeglądy w: Proctor i Woodel 1975, Brooks 1987, Roberts i Proctor 1992). Takiego poglądu nie potwierdzają wyniki niniejszej pracy. Badane gleby serpentynitowe charakteryzowały się relatywnie wysoką pojemnością wodną, były bardziej zasobne w materię organiczną oraz azot od wapiennych i granitowych, w dodatku przewyższały zawartością fosforu i potasu gleby wapienne, a od granitowych nie różniły się istotnie. O specyficznych właściwościach gleb serpentynitowych zadecydowały głównie wysokie koncentracje dostępnych form magnezu, niklu, chromu, kobaltu i żelaza oraz wyraźna przewaga magnezu nad wapniem.

## 6.2 Roślinność badanych muraw

### 6.2.1 Wpływ czynników siedliskowych na kompozycję gatunkową ciepłolubnych muraw

Wyniki badań nad roślinnością muraw Środkowej i Południowej Europy wykazały, że ogólna kompozycja florystyczna muraw zależy od właściwości siedliskowych, takich jak rodzaj podłoża, odczyn lub stadium rozwoju gleby (Becker i Brändel 2007, Pedashenko i in. 2013). W przedstawianej pracy zawartości wymienne wapnia najbardziej różnicowały roślinność badanych siedlisk. Również wysokość hipsometryczna oraz zawartości wymienne magnezu, niklu i manganu oraz azotu całkowitego miały istotne znaczenie. Cachovanová i in. (2012) badali zbiorowiska muraw na terenie Zachodnich Karpat na Słowacji i stwierdzili, że głównymi czynnikami różnicującymi tamtejszą roślinność były odczyn oraz zawartości wapnia w glebie. Autorzy wymieniali również głębokość gleb, wysokość hipsometryczną oraz zawartość wymiennych form magnezu, które także miały wpływ na florę badanych muraw, choć już mniej znaczący. Z kolei Dubrávková i Košťál (2012), prowadząc badania w tym samym rejonie co wyżej wspomniani badacze (Białe Karpaty, Słowacja), na podstawie analizy PCA odnotowali, że oprócz wysokości hipsometrycznej dodatkowo miąższość gleby oraz temperatura siedlisk, wyrażona wskaźnikiem Borghini'ego były czynnikami najbardziej modyfikującymi zmienność składu gatunkowego kwaśnolubnych suchych muraw. Natomiast po selekcji zmiennych, w analizie redundancji (RDA), najbardziej istotne okazały się długość geograficzna, pH gleby, nachylenie stoku oraz szerokość geograficzna, które wyjaśniały ogólną wariację niemal całkowicie (99.99%). W niniejszych badaniach miąższość gleb również wpływała istotnie na zróżnicowanie badanych siedlisk jako jedyny czynnik spośród właściwości fizycznych gleb. Potwierdzają to badania z obszaru wyżynnych muraw południa Czech (Merunková i Chytrý 2012). Kanoniczna analiza zgodności (CCA) w cytowanej pracy wykazała istotny wpływ m.in. miąższości gleby na kompozycję gatunkową muraw, przy czym zmienne dotyczące zawartości materii organicznej, ładunku ciepła i koncentracji wapnia w glebie w największym stopniu wyjaśniały jej zmienność. Brković i in. (2015), którzy porównywali zbiorowiska ciepłolubnych murawy na podłożach węglanowych, krzemianowych oraz serpentynitowych w północno-zachodniej oraz centralnej części Serbii, stwierdzili, że na zróżnicowanie roślinności bardziej niż typ podłoża, a tym samym i jego właściwości geochemiczne, wpływają czynniki środowiskowe, takie jak wilgotność i rodzaj siedliska.

Podobne wnioski przedstawili Dengler i in. (2012), w oparciu o wyniki badań rumuńskich muraw z rzędu *Festucetalia valesiaca*. Wykazali oni najsilniejsze zróżnicowanie wzdłuż gradientu wilgotności, a także od gleb płytkich i kamienistych po głębokie w niższych położeniach. Dubrávková i in. (2010) wymieniają zarówno wilgotność jak i zasobność oraz typ siedliska. Autorzy podkreślają również, obok właściwości siedliskowych, wpływ aspektu historycznego, a zwłaszcza zagospodarowania terenu, na kompozycję gatunkową muraw. Podobne wnioski sformułował Roleček i in. (2014) Stwierdzili, że tradycyjne użytkowanie półsuchych muraw z koszeniem bez nawożenia istotnie wpłynęło na zachowanie bogactwa gatunkowego tego typu siedlisk u podnóża Karpat Wschodnich.

Interesujące wyniki przedstawili Adamidis i in. (2014) w pracy dotyczącej zróżnicowania roślinności naturalnych muraw śródziemnomorskich na wyspie Lesbos. Porównywali sąsiadujący typ zbiorowiska na podłożu serpentynitowym oraz nieserpentynitowym. Wykazali, że wpływ czynników siedliskowych na skład roślinności różnił się w zależności od typu podłoża. Stwierdzili, że pH gleby, zawartość fosforu oraz wysokość hipsometryczna wpływała na pojawienie się gatunków na stanowiskach nieserpentynitowych, podczas gdy na podłożu serpentynitowym to zawartości wymienne chromu, żelaza i niklu w glebie jak również wysokość hipsometryczna determinowały pojawienie się tych samych gatunków.

### **6.2.2 Wpływ czynników siedliskowych na bogactwo gatunkowe i produkcję biomasy ciepłolubnych muraw**

Roślinność muraw z różnych podłoży geologicznych badanych w tej pracy charakteryzowała się podobną liczbą gatunków oraz różnorodnością wyrażoną wskaźnikiem Shannona-Wienera. Nie odnotowano także niższej produktywności siedlisk serpentynitowych w porównaniu z wapiennymi oraz granitowymi.

Liczba gatunków na powierzchniach badawczych nie zależała od skały macierzystej podłoża. Co ciekawe, istotne różnice zarysowały się między dwiema jednostkami fizjogeograficznymi z powierzchni serpentynitowych oraz wapiennych (por. tab. 10). Wyjaśnieniem zaistniałej sytuacji może być fakt, że unikatowy zestaw właściwości siedliskowych w obrębie poszczególnych jednostek fizjograficznych w większym stopniu wyrażał odrębność tych stanowisk niż ogólnie ujęte kryterium 'podłoża geologicznego'. Jest to zgodne z tezą Ejrnæs'a i Bruun'a (2000), którzy podkreślili, że kompozycja gatunkowa roślinności nie może być wyjaśniania przez pojedyncze gradienty ekologiczne, lecz przez

zestaw tych gradientów. W przeciwnym razie interpretacja wyników jest niepełna. Podobne wnioski sformułował Żołnierz (2007) w swojej pracy na temat zbiorowisk trawiastych na serpentynitach Dolnego Śląska. Zauważył, że nie ma generalnej zasady reakcji roślinności na zespół czynników tzw. kompleksu serpentynitowego, co najwyżej można podjąć próbę wyjaśnienia ich w skali regionalnej.

Liczne badania wskazują na wyższe bogactwo gatunkowe zbiorowisk trawiastych na na podłożu wapiennym lub o wyższym pH gleby (Bruun i Ejrnæs 2000, Ejrnæs i Bruun 2000, Chytrý i in. 2003, Becker i Brändel 2007). Jak podają Chytrý i in. (2003) i Ewald (2003) wynika to z istniejących dysproporcji w lokalnych florach europejskich muraw między kalcyfitami i acydofitami, w których procesy ewolucji zbiorowisk trawiastych działały na korzyść tych pierwszych. Cachovanová i in. (2012) zauważyli, że rośliny przystosowane do gleb zasadowych wykazują również tolerancję na inne niekorzystne czynniki środowiskowe, charakteryzują się zatem wyższą konkurencyjnością. Stąd ich częstsze występowanie na murawach, które są zbiorowiskami nierzadko poddanymi działaniu kompleksowi trudnych warunków. Wspomniani autorzy nie wykazali jednak korelacji bogactwa gatunkowego badanych muraw ani z typem podłoża, ani z zawartością wymiennych form wapnia, magnezu, potasu oraz żelaza jak również pH gleby lub wysokością hipsometryczną. Merunková i Chytrý (2012) stwierdzili niskie bogactwo gatunkowe na siedliskach o  $\text{pH} < 4.6$  oraz brak zależności pomiędzy odczynem a liczbą gatunków powyżej tej wartości. Odnotowali ponadto, że zawartości materii organicznej, fosforu i potasu w glebie oraz wysokość hipsometryczna były ujemnie skorelowane z liczbą gatunków na obszarze południowych Czech, w przeciwieństwie do ładunku ciepła.

Roślinność badanych siedlisk nie wykazywała zróżnicowania pod względem liczby gatunków oraz współczynników różnorodności i równocенności Shannona-Wienera jak również biomasy roślin. Jedynym badanym parametrem, który różnicował powierzchnie wykształcone na odmiennych podłożach geologicznych, było zwarcie warstwy zielnej badanych powierzchni. Z kolei Adamidis i in. (2014) wykazali istotnie niższe wartości współczynników  $H'$  i  $J'$  Shannona-Wienera, jak również bogactwa gatunkowego oraz liczby gatunków dominujących na murawach serpentynitowych w porównaniu do muraw na odmiennych podłożach. Natomiast podobnie jak w niniejszej pracy, nie stwierdzili różnic w wielkości biomasy nadziemnych części roślin. Brković i in. (2015), konfrontując zbiorowiska ciepłolubnych muraw wykształconych na odmiennych skałach, w tym serpentynitowych, nie zaobserwowali różnic w różnorodności roślinności zależnie od typu



podłoża, natomiast odnotowali większą różnorodność florystyczną w obrębie zbiorowisk na serpentynitach niż w równoważnych typach zbiorowisk, ale na innych podłożach geologicznych. Tymczasem Sasse (1979a) na podstawie badań obejmujących różne typy roślinności na serpentynitach stwierdził, że bardziej zwarta oraz bogatsza roślinność była przede wszystkim skorelowana z niższą zawartością niklu w glebie.

### **6.2.3 Wpływ właściwości siedlisk na pobieranie makro- i mikroelementów oraz toksycznych metali ciężkich przez wybrane gatunki ciepłolubnych muraw**

Pobieranie pierwiastków przez rośliny jest procesem, na który niewątpliwie wpływa rodzaj skały macierzystej gleby. Jak już przedstawiono we wcześniejszym rozdziale (por. 6.1), to właśnie kompozycja minerałów w skałach granitowych, wapiennych lub serpentynitowych warunkowała w dużej mierze właściwości chemiczne tych gleb. Wiele badań dotyczących gleb serpentynitowych potwierdza zależność między składem pierwiastkowym roślin oraz gleb, na których rosły (m.in. Kataeva i in. 2004). U wszystkich gatunków siedlisk serpentynitowych badanych w tej pracy wykazano istotnie wyższe koncentracje magnezu oraz niklu, a u większości istotnie niższe koncentracje wapnia. Przewaga magnezu nad wapniem w pędach badanych gatunków odzwierciedlała, odwrotnie niż zazwyczaj, proporcje tych składników w glebach.

Rośliny rosnące na glebach wapiennych i granitowych odznaczały się niższymi koncentracjami magnezu niż te z siedlisk serpentynitowych. W oparciu o zakresy podane przez Szymańską (2012) można stwierdzić, że były one prawidłowo odżywione magnezem, jednak na podstawie przedziałów proponowanych przez Hawkesforda i in. (2012) populacje wapienne dziurawca zawierały mniej magnezu niż potrzeba do optymalnego wzrostu roślin. Najniższe zawartości magnezu we wspomnianych populacjach dziurawca były niższe niż podają Pavlova (2009), Samecka-Cymerman i in. (2009) oraz Tomović i in. (2018) dla roślin z podłoża nieserpentynitowych Bułgarii, Polski oraz Serbii.

Najwięcej magnezu stwierdzono w nadziemnych częściach wilczomlecza sosnki oraz macierzanki zwyczajnej. Ogólnie poziom odżywienia magnezem roślin rosnących na glebach serpentynitowych wpisuje się w zakresy podane przez Żołnierza (2007), Samecką-Cymerman i in. (2009), Pędziwiatę i in. (2018) oraz Tomović i in. (2018). W dwóch ostatnich pracach porównywano skład chemiczny roślin rosnących również na odmiennym podłożu niż ultramaficzne i podobnie jak w tej pracy potwierdzono wyższe zawartości

magnezu u roślin z gleb serpentynitowych. Nie zaobserwowali zaś takiej tendencji ani Pavlova (2009) ani Zlatić i in. (2017), którzy prowadzili badania nad dwoma gatunkami ożanki (*T. chamaedrys* i *T. montanum*) z różnych podłoży geologicznych na obszarze Półwyspu Bałkańskiego. Prawdopodobnie wynikało to z fizjologii badanych gatunków. Ożanka nawet na podłożach serpentynitowych kumulowała nawet ponad pięciokrotnie więcej wapnia niż magnezu i nie wynikało to z wysokich koncentracji tego pierwiastka w glebie. Wydaje się zatem, że stosunkowo wysokie pobieranie wapnia i kumulacja w liściach, jest jej cechą gatunkową, podobnie jak u gatunków badanych przez Vicić'a i in. (2014) – *Seseli rigidum* oraz endemitu serpentynitowego *Halacsya sendtneri*, a także u roślin z rodzaju *Alyssum* i *Dianthus*, a czasami również z rodzaju *Thymus* (Vergnano Gambi i in. 1982). Podane przykłady silnego pobierania wapnia mogą być przystosowaniami roślin do nietypowych właściwości siedlisk serpentynitowych. W niniejszej pracy *Thymus pulegioides* wyróżniała się wręcz jedną z wyższych wartości stosunku Mg/Ca, czyli odwrotnie niż podają wspomniani autorzy. Dla gatunków rosnących na glebach serpentynitowych obliczono współczynnik koncentracji, który określa stopień wykorzystania przez rośliny pierwiastków obecnych w glebie.  $WK_{Mg}$  dla wszystkich badanych gatunków zawierały się w dość wąskim zakresie, a ich wartości znacząco przekraczały przedział podany przez Samecką-Cymerman i in. (2009) u paproci *Pteridium aquilinum* z dolnośląskich serpentynitów.

Kluczowe znaczenie w glebach serpentynitowych odgrywają nie tylko zawartości magnezu i wapnia jako takie, ale bardziej proporcje między nimi. Niejednokrotnie stosunek Mg/Ca w tkankach roślin z siedlisk serpentynitowych odzwierciedla zasobność podłoża w te składniki (Żołnierz 2004). W niniejszej rozprawie u gatunków siedlisk serpentynitowych zaobserwowano przewagę magnezu nad wapniem. Stosunek molarny Mg/Ca był wyższy od jedności lub co najmniej równy, jak w przypadku *Galium verum*. Te same gatunki na wapieniach i granitach osiągały zdecydowanie niższe wartości stosunku Mg/Ca. Wyjątkowo u *Euhorbia cyparissias* przewaga magnezu nad wapniem bardziej zaznaczyła się u osobników z gleb granitowych niż z wapiennych i była to różnica statystycznie istotna. Najwyższym stosunkiem Mg/Ca spośród populacji serpentynitowych wyróżniał się *Hypericum perforatum*. W niektórych próbach przewaga magnezu nad wapniem była nawet około czterokrotna. Możliwe jest, że tak obfite kumulowanie magnezu pozwala na ograniczenie pobierania niklu u tego gatunku. Także Pędziwiatr i in. (2018) podejrzewają, że magnez może redukować akumulację metali przez rośliny. Zdolność dziurawca do

redukcji pobierania niklu udowodniły Pavlova i Karadjova (2013), a także Bonari i in. (2019), tłumacząc sprawnym mechanizmem wykluczania metali. Wymienieni autorzy nie badali jednak zawartości magnezu w tkankach u tego gatunku. W pędach przytulii, z kolei, odnotowano równowagę między magnezem i wapniem. Wartość stosunku Mg/Ca u osobników ze Szklar oraz z obszaru Kamiennego Grzbietu była bardzo zbliżona, w przeciwieństwie do *T. pulegioides*. Dokładnie taką zależność u przytulii zwyczajnej zaobserwowali Pędziwiatr i in. (2018) i to stało się przyczyną podjęcia podobnych analiz w niniejszym opracowaniu. U pozostałych gatunków autorzy wykazali znaczne różnice stosunku Mg/Ca, która u *Scabiosa ochroleuca* była nawet ponad czterokrotna między badanymi obiektami. W tej pracy, ze względu na brak osobników driakwi żółtej z Masywu Szklar, nie porównano tej zależności.

Chociaż niski poziom wapnia w glebach serpentynitowych wymieniany jest jako przyczyna słabego odżywienia roślin w ten pierwiastek, to jako taki nie ma kluczowego znaczenia. Już Brooks (1987) podkreślał, że nie to w istocie jest przyczyną jego niskich zawartości w roślinach, a dopiero jednoczesne oddziaływanie wysokich stężeń magnezu, które *de facto* prowadzą do niedoborów wapnia, zwłaszcza u populacji nieprzystosowanych do siedlisk serpentynitowych (Vicić i in. 2014). Wyniki przedstawione w niniejszej pracy nie wskazują na deficyt wapnia u badanych roślin (Hawkesford i in. 2012, Szymańska 2012), choć faktycznie, te z podłoży serpentynitowych osiągały jego niższe stężenia, nie przekraczające 8000 mg kg<sup>-1</sup> s.m. Kataeva i in. (2004) również podają tę samą wartość jako górną granicę koncentracji wapnia w roślinach rosnących na glebach ultramaficznych Uralu Polarnego. Pavlova (2009) odnotowała podobną zależność u *Teucrium chamedrys*. Rośliny z podłoży serpentynitowych kumulowały kilkakrotnie mniej wapnia w stosunku do tych z innych podłoży, nie przekraczając jednocześnie podanej powyżej wartości. Koncentracje wapnia w pracy Pędziwiata i in. (2018) były bardzo zbliżone do stwierdzonych w niniejszej rozprawie. Żołnierz (2007), z kolei, podaje nieco wyższe maksymalne zawartości dla roślin z siedlisk serpentynitowych Dolnego Śląska. Autor stwierdził, że rośliny na ogół kumulowały wapń i magnez w podobnych ilościach. U niektórych gatunków podjętych badań również było to widoczne, najwyraźniej u wilczomlecza sosnki oraz macierzanki zwyczajnej, co również wykazali Vergnano Gambi i in. (1982) u *E. cyparissias* z serpentynitów w Apeninach. Także Samecka-Cymerman i in. (2009) wykazali niemal jednakowe koncentracje średnich zawartości wapnia i magnezu u paproci *P. aquilinum* z Masywu Ślęży. Równocześnie odnotowali wyższe wartości współczynnika koncentracji

wapnia, nawet do kilkunastu razy wyższe niż średnia wartość dla badanych gatunków przedstawianej pracy. Jak już wcześniej wspomniano, *H. perforatum* akumulował najmniej wapnia, ponadto  $WK_{Ca}$  okazał się istotnie niższy niż u pozostałych czterech gatunków.

Rośliny siedlisk bogatych w metale ciężkie wykazywały ich wyższą zawartość w pędach (Samecka-Cymerman i in. 2009, Alekseeva-Popova i in. 2015, Salihaj i in. 2018, Tomović i in. 2018). Szczególnie wysoką zdolność do gromadzenia metali, przede wszystkim niklu, zaobserwowano w tej pracy u *E. cyparissias*, na co już wcześniej zwrócił uwagę Żołnier (1993, 2007), a także Stefanowicz i in. (2016), którzy stwierdzili u niego jedne z najwyższych zawartości kadmu, ołowiu i cynku w korzeniach spośród analizowanych roślin rosnących na hałdach pokopalnianych. Żaden z gatunków w niniejszej rozprawie naukowej nie wykazał zdolności do hiperakumulacji któregoś z badanych metali. U wszystkich gatunków z podłoży serpentynitowych odnotowano istotnie wyższe koncentracje niklu w porównaniu do pozostałych i zasadniczo zawartość niklu w pędach roślin wyrażała poziom dostępnych form tego metalu w glebach. Stężenie niklu w roślinach z podłoży nieserpentynitowych wpisywał się w zakres podany przez Reeves'a i Kruckeberg'a (2018), za wyjątkiem *Thymus pulegioides* z wapieni, u której odnotowano bardzo niską zawartość niklu – 0.30 mg kg<sup>-1</sup> s.m. Jak już nadmieniono, wilczomlec sosnka wyróżniał się na tle pozostałych gatunków pod względem kumulacji metali, zwłaszcza niklu. Wszystkie populacje serpentynitowe odznaczały się wysoką kumulacją niklu (Reeves i Baker 2000), zwłaszcza ta z Gogołowa (S18), u której maksymalnie stwierdzono ok. 200 mg kg<sup>-1</sup> s.m. tego metalu. Dla osobników wilczomlecza z serpentynitowych populacji wartość współczynnika  $WK_{Ni}$  była wyższa od ok. trzech do czterech i półkrotnie od pozostałych gatunków, przy czym dla wymienionej powierzchni badawczej  $WK_{Ni}$  obliczony na podstawie form wymiennych ekstrahowanych DTPA wynosił  $WK_{Ni}=8$ . W porównaniu do wyników Sameckiej-Cymerman i in. (2009) jest kilkakrotnie wyższy. Żołnier (2007) badając roślinność dolnośląskich serpentynitów zaobserwował podobne tendencje kumulacji niklu u analizowanych gatunków. Jedynie *Silene vulgaris* osiągała wyższe stężenia niż wilczomlec sosnka. Ponadto zawartości niklu w pędach *Euphorbia cyparissias*, *Galium verum* oraz *Thymus pulegioides* w jego badaniach osiągały wartości zbliżone do podanych w tej pracy. Z kolei Pędziwiatr i in. (2018) przedstawili niższe zawartości tego metalu u *E. cyparissias*. Wspomniani autorzy zauważyli, że gatunki rosnące w Jordanowie kumulowały więcej niklu niż te z Masywu Szklar, czyli podobnie jak w niniejszym opracowaniu. Taką tendencję zaobserwował również Żołnier (2004) w doświadczeniu

szklarniowym u roślin uprawianych na glebach pochodzących z tych obszarów. Badał on reakcję roślin uprawnych: owsa, gorczyca białej, soi oraz bobiku i w każdym przypadku, zawartość niklu w pędach była wyższa na glebie z Kamiennego Grzbietu o ok. 50–130%. Przytoczone wyniki, zarówno cytowanych publikacji jak i prezentowanej pracy, wskazują na większą kumulację niklu przez rośliny z obszarów o zdecydowanie niższych zawartościach form wymiennych tego metalu. Gleby Masywu Szklar w tej pracy charakteryzowały się ponad czterokrotnie wyższymi ich stężeniami. Według Pędziwiatra i in. (2018) ujawnił się wpływ skały macierzystej gleb na akumulację metali przez badane gatunki. Gleby z obszaru Szklar zostały wykształcone na zserpentyinizowanym perydotycie, podczas gdy te z Jordanowa na serpentynie. Pierwszy typ odznaczał się większą zasobnością w wapń i magnez, które to elementy były faworyzowane podczas pobierania przed niklem i innymi metalami (Pędziwiatr i in. 2018). Na kwestię pedogenezy i jej fundamentalnego wpływu na właściwości gleby, a w tym dostępność niklu, zwrócili uwagę także Chardot i in. (2007), badając gleby serpentynitowe pasma Wogezów we Francji. Wykazali, że pobieranie tego metalu przez rośliny było zależne od stężenie jego rozpuszczalnych form w roztworze glebowym. Jednak pomimo bardzo wysokiej puli wymiennego niklu w glebie, przekraczającej 50% zawartości całkowitych, jego zawartości w roztworze nie były krytyczne dla roślin.

Mimo często wysokich koncentracji chromu, jego dostępność dla roślin w przypadku gleb serpentynitowych jest wręcz znikoma (Shewry i Peterson 1976). Spowodowane jest to ogólną tendencją w glebie do redukcji jonów  $\text{Cr}^{6+}$ , które są łatwo rozpuszczalne, do bardzo słabo przyswajalnych  $\text{Cr}^{3+}$ . Ponadto w przedziale od pH 5.5 do około pH 8 drastycznie spada dostępność kationów  $\text{Cr}^{6+}$ , a  $\text{Cr}^{3+}$  ulega nawet wytrąceniu (Kabata-Pendias i Pendias 1993). Biorąc pod uwagę, że odczyn większości gleb serpentynitowych wpisuje się w podany powyżej zakres, wydaje się, że faktyczna zawartość chromu w roztworze glebowym wydaje się bardzo ograniczona. Zasadniczo, rośliny z odmiennych podłoży geologicznych w obrębie gatunku nie wykazały rozbieżności w zawartości chromu w nadziemnych częściach, jedynie populacje serpentynitowe wilczomleczka sosnki zawierały mniej tego metalu w porównaniu do dwóch pozostałych. Stopień wykorzystania dostępnych form chromu różnił się jedynie pomiędzy *Galium verum* i *Thymus pulegioides*, przy czym najwyższy  $\text{WK}_{\text{Cr}}$  odnotowano u pierwszego z wymienionych gatunków. Średnie koncentracje chromu w pędach *Thymus pulegioides* z wapieni oraz z granitów wyznaczał odpowiednio dolną i górną granicę zawartości chromu dla wszystkich badanych roślin, którego stężenie nie przekraczało

5 mg kg<sup>-1</sup>. Żołnierz (2007) wykazał odpowiednio siedmiokrotnie i trzykrotnie wyższe stężenia chromu u wilczomlecza sosnki i macierzanki zwyczajnej rosnących na podłożach serpentynitowych Dolnego Śląska. Podobnie Jakovljević i in. (2019) odnotowali ponad siedmiokrotnie więcej tego metalu w przypadku populacji serpentynitowych *Hypericum perforatum*. Z kolei dziurawiec zwyczajny z gleb ultramaficznych w Południowej Toskanii zawierał chrom w ilościach bardziej zbliżonych do podanych w tej pracy (Bonari i in. 2019). Autorzy tej pracy nie wykazali istotnych rozbieżności w zawartości tego metalu w nadziemnych częściach *H. perforatum*, rosnących na pięciu odmiennych podłożach geologicznych, w tym wapiennym oraz ultramaficznym. Generalnie, rośliny z gleb serpentynitowych Serbii i Bułgarii charakteryzowały się wyższymi koncentracjami chromu niż w tej pracy (Pavlova i Karadjova 2013, Jakovljević i in. 2019). Również badania gatunków serpentynitowych z obszaru Francji, Włoch, Austrii i Niemiec, wykazały, że rośliny kumulowały nawet do 50 mg Cr kg<sup>-1</sup> s.m. (Sasse 1979 b).

Pobieranie kobaltu jest ściśle związane z zawartościami jego form dostępnych w roztworze glebowym (Kabata-Pendias i Mukherjee 2007), choć nie zaobserwowano takiej zależności w niniejszej pracy. Podobnie w badaniach Bonari'ego i in. (2019). Salihaj i in. (2018) na podstawie analizy 162 gatunków flory serpentynitowej z Kosowa wykazali, że stężenia tego metalu zawierały się w przedziale od <1 do nieco ponad 7 mg kg<sup>-1</sup>, z kolei Sasse (1979b) odnotował u gatunków z państw Europy południowo-zachodniej nawet do 20 mg Co kg<sup>-1</sup> s.m. U wszystkich gatunków prezentowanej pracy zawartości kobaltu nie przekroczyły lub były bardzo zbliżone do poziomu 1 mg kg<sup>-1</sup> s.m. za wyjątkiem wilczomlecza sosnki. Jego populacje serpentynitowe osiągnęły najwyższe koncentracje, niemniej jednak zawartości kobaltu nie odbiegały od przeciętnych koncentracji jakie uzyskują rośliny z metalonośnych gleb (Reeves i Baker 2000). Żołnierz (2007) wykazał takie same tendencje u badanych gatunków, przy czym wraz z *E. cyparissias* również *Silene vulgaris* wykazywała wyższe koncentracje kobaltu niż 1 mg kg<sup>-1</sup>. Co więcej, zawartości kobaltu u *E. cyparissias*, *G. verum* oraz *T. pulegioides* zasadniczo były zbliżone z prezentowanymi w niniejszym opracowaniu. Pędziwiatr i in. (2018), natomiast, odnotowali ponad trzykrotnie niższe zawartości kobaltu w nadziemnych częściach wilczomlecza sosnki rosnących na podobnym obszarze, choć i tak wyróżniał się jego wyższą kumulacją na tle pozostałych gatunków. Jeszcze wyższe koncentracje kobaltu niż u *E. cyparissias* odnotowali u *S. ochroleuca*, rosnącej na glebie serpentynitowej w Jordanowie. Były one prawie czterokrotnie wyższe niż u osobników driakwi w tej pracy z podobnego obszaru. Bonari i

in. (2019) odnotowali niemal identyczne zawartości kobaltu u dziurawca zwyczajnego rosnącego na glebach ultramaficznych środkowej części Włoch jak w niniejszych badaniach.

Pobieranie i akumulacja składników pokarmowych przez rośliny jest złożonym procesem, o którym decydują takie czynniki jak pH roztworu glebowego (Brooks 1987, Kabata Pendias i Mukherjee 2007), wzajemne relacje między pierwiastkami (Licina i in. 2010), a także lokalne warunki ekologiczne (Bini i in. 2017), w tym czynniki topograficzno-klimatyczne, takie jak miąższość gleby, stosunki wodne oraz zawartość materii organicznej (Mišljenović i in. 2018). Rodzaj skały macierzystej gleb silnie oddziałuje na właściwości fizyko-chemiczne wykształconych na nich gleb, w tym na mobilność i dostępność dla roślin metali ciężkich (Kierczak i in. 2007, Alexander 2009, Kierczak i in. 2016, Bini i in. 2017, Pędziwiatr i in. 2018, Marescotti i in. 2019). W niniejszej pracy wykazano wpływ skały macierzystej oraz właściwości gleb na akumulację makro- i mikroelementów, a także metali ciężkich przez wybrane gatunki ciepłolubnych muraw. Zaobserwowano również, że dynamika pobierania metali jest cechą charakterystyczną dla danego gatunku (Shewry i Peterson 1976, Pavlova i Karadjova 2013, Alekseeva-Popova i in. 2015). Zaobserwowano zarówno między- jak i wewnątrzgatunkowe różnice, które dotyczyły również pochodzenia populacji z odmiennych podłoży geologicznych. Ogólnie rośliny odzwierciedlały skład chemiczny gleb na których rosły. Według kryterium zaproponowanego przez Reeves'a i Baker'a (2000) u wszystkich badanych gatunków z siedlisk serpentynitowych, za wyjątkiem *Euphorbia cyparissias* stwierdzono przeciętne zawartości niklu, chromu, manganu, kobaltu, miedzi oraz cynku. Wilczomlec sosnka wykazał zdolność do wysokiej akumulacji niklu oraz nieco wyższej niż przeciętnie akumulacji miedzi jak na gleby metalonośne.

## **6.3 Badania doświadczalne**

### **6.3.1 Wzrost i pobieranie składników mineralnych przez rośliny uprawiane w kulturach wodnych przy różnych stężeniach niklu oraz stosunku Mg/Ca**

Zagadnienie wyodrębniania się ekotypów tolerancyjnych na nikiel zajmowało licznych badaczy. Wyższą tolerancję populacji serpentynitowych w stosunku do pochodzących z innych podłoży opisano m.in. dla *Silene vulgaris* (Bratteler i in. 2002), *Cerastium alpinum* (Nyberg Berglund i in. 2003) oraz *Alyssum murale* (Asemaneh i in. 2006). Z drugiej strony Westerbergh (1994) oraz Remon i in. (2007) nie stwierdzili takich

różnic u populacji odpowiednio *Silene dioica* oraz *Plantago arenaria*. Autorzy uznali, że tolerancja na nikiel jest konstytutywną cechą u tych gatunków.

Doświadczenie w kulturach wodnych, polegające na określeniu wpływu niklu przy zróżnicowanych wartościach stosunku Mg/Ca, dowiodło toksyczności niklu na badane gatunki zarówno w populacjach serpentynitowych jak i nieserpentynitowych. Nastąpiło ograniczenie lub całkowite zahamowanie przyrostu korzenia *Euphorbia cyparissias* i *Galium verum* przy obu dawkach niklu i wyrównanym stosunku Mg/Ca. Silny toksyczny efekt niklu można tłumaczyć jego bardzo wysokimi stężeniami użytymi w doświadczeniu. W testach tolerancji zazwyczaj stężenia tego pierwiastka nie przekraczają 1 mg Ni dm<sup>-3</sup>. Zastosowany zakres stężeń po wstępnych badaniach został dobrany tak, by określić wpływ zmiennej wielkości stosunku Mg/Ca na toksyczność niklu, co było głównym celem tych doświadczeń.

O ile nie stwierdzono oznak tolerancji na nikiel przy zrównoważonym stosunku Mg/Ca, to u obu badanych gatunków wystąpiły symptomy detoksykacji niklu pod wpływem rosnących wartości stosunku Mg/Ca. Efekt ten był wyraźniejszy w populacjach serpentynitowych, szczególnie u wilczomlecza.

Proctor i McGowan (1976) jako pierwsi wykazali wpływ magnezu detoksykujący nikiel u serpentynitowych populacji roślin. Również badania Żołnierza (1989) populacji *Plantago lanceolata* z serpentynitów w Szklarach także to potwierdzają. Nyberg Berglund i in. (2003) również wykazali neutralizujący wpływ negatywnego działania niklu na rośliny w obecności wyższych zawartości magnezu w pożywce. Co więcej, w przypadku populacji serpentynitowej było to bardziej wyraźne niż u nieserpentynitowych. Biorąc pod uwagę większą tolerancję osobników *E. cyparissias* z powierzchni N1 na badane czynniki kompleksu serpentynitowego, można przypuszczać, że ich odporność indukowana jest niższym stosunkiem Mg/Ca w pędach roślin. Takiej tendencji nie wykazywała jednak populacja granitowa, u której akumulacja wapnia przeważała nad magnezem lub była bliska równowagi. Podobnie Veatch-Blohm i in. (2013) wykazali u populacji serpentynitowej *Arabidopsis lyrata* ssp. *lyrata* zdecydowanie niższy wewnętrzny stosunek Mg/Ca w porównaniu m.in. z populacją z wapieni przy różnych proporcjach tych metali w pożywce. Według autorów nie skutkowało to żadnymi korzystnymi zmianami czy to we wzroście czy w wyglądzie roślin, choć należy zaznaczyć, że autorzy badali wyłącznie wpływ proporcji Mg i Ca na rośliny, bez dodatkowej ekspozycji na metale ciężkie. Korzystny wpływ przewagi magnezu nad wapniem w pożywce zaobserwowali także Lombini i in. (2003) u



*Silene armeria* w kontekście jej tolerancji na miedź. Populacja serpentynitowa kumulowała więcej tego metalu, bez zwiększenia efektu toksyczności. Z kolei u osobników pochodzących z wyrobisk kopalni miedzi wyższy stosunek Mg/Ca zwiększał wytrzymałość na stężenie miedzi w pożywce, stwierdzoną na podstawie przyrostów korzeni. Cytowani autorzy nie zaobserwowali tego efektu w populacji wapiennej, podobnie jak w przedstawianej rozprawie. Autorzy tłumaczą ten fakt lepszą wewnętrzną detoksykacją miedzi przy wysokim stosunku Mg/Ca oraz podkreślają, że musi to być jednocześnie powiązane z adaptacją roślin do takich warunków wzrostu w naturalnym środowisku. Veatch-Blohm i in. (2013) nie wykazali różnic między populacjami *Arabidopsis lyrata* ssp. *lyrata*, u której tempo wzrostu korzeni siewek populacji serpentynitowej oraz wapiennej nie różnił się zależnie od stosunku Mg/Ca w pożywce. W niniejszych badaniach również nie odnotowano różnic przyrostu pędów lub korzeni w badanych gatunkach przy odmiennych proporcjach Mg i Ca w pożywce bez dodatku niklu. Pakdaman i in. (2013) wykazali większą redukcję biomasy u osobników populacji nieserpentynitowej *Pistacia atlantica* przy wysokich wartościach Mg/Ca w porównaniu do serpentynitowej, która okazała się bardziej wytrzymała w tych warunkach. Rośliny serpentynitowe mają stosunkowo duże zapotrzebowanie na magnez i jednocześnie tolerują niskie poziomy wapnia, prawdopodobnie, dzięki lepszej zdolności do jego pobierania (Asemaneh i in. 2007).

Stosunek Mg/Ca w podłożu może dodatkowo odgrywać znaczącą rolę w odporności roślin na suszę, co jest istotne w wypadku większości typowych siedlisk serpentynitowych. Salehi-Eskandari i in. (2018) na podstawie eksperymentu z dwoma endemitami serpentynitowymi z Iranu stwierdzili, że w warunkach większej przewagi magnezu nad wapniem w roztworze nie dochodziło do znaczącej redukcji biomasy pędów i korzeni u badanych roślin pod wpływem indukowanej chemicznie suszy.

Zazwyczaj obecność niklu w podłożu powoduje szereg niekorzystnych zmian w funkcjonowaniu roślin, nierzadko oddziałuje wręcz toksycznie, powodując m.in. poważne zahamowanie wzrostu, degradację chlorofilu lub peroksydację lipidów (Stanisavljević i in. 2018, Lešková i in. 2020). Niemniej jednak literatura podaje także stymulujący wpływ tego metalu na ich rozwój (Ghasemi i in. 2014). Nierzadko dotyczy to endemitów gleb serpentynitowych oraz hiperakumulatorów niklu. Z drugiej strony Reeves i Baker (1984) nie znaleźli dowodów na zwiększone zapotrzebowanie niklu przez rośliny serpentynitowe.

W warunkach laboratoryjnych populacja granitowa wilczomlecza odznaczała się wyższymi stężeniami manganu, co odnotowano również u osobników tego gatunku

rosnących naturalnie na glebach granitowych. Mogło to być związane z wykształceniem mechanizmów adaptacyjnych u tych populacji do wysokich koncentracji tego metalu w glebie w naturalnym środowisku. W wielu pracach udowodniono, że rośliny narażone na działanie czynników stresowych w naturalnym środowisku wykazują tolerancję w stosunku do danego czynnika (Symeonidis i in. 1985, Lombini i in. 2003, Nyberg Berglund i in. 2003, Pakdamana i in. 2013, Visioli i in. 2014, Veatch-Blohm i in. 2017). Z drugiej strony doniesienia o tym, że populacje występujące na terenach o wysokiej koncentracji danego metalu powinny być bardziej tolerancyjne na ich zawartości nie znajduje potwierdzenia w badaniach Remona i in. (2007) oraz Westerbergh (1994), o czym wspomniano już na początku tego rozdziału. Może to świadczyć o tolerancji gatunku na podwyższone stężenia metali bez względu na to czy roślina była na nie narażona w naturalnym środowisku. Taka tolerancja jest dziedziczna i występuje np. u *Mimulus guttatus* w stosunku do niklu (Tilstone i Macnair 1997). Stwierdzono również, że tolerancja na metale jest specyficzna dla gatunku, co więcej, jest różna dla poszczególnych metali (Baker 1981, Remon i in. 2007).

Wiele badań potwierdziło odrębność genetyczną ekotypów serpentynitowych (Bradshaw 2005, Turner i in. 2010, Visioli i in. 2014, Muszyńska i in. 2019). Z kolei Zoldoś i in. (2018) nadają duże znaczenie różnorodności epigenetycznej, rozumianej jako zmienność w ekspresji genów bez modyfikacji sekwencji DNA, która oprócz zmienności genetycznej może być ważnym elementem w adaptacji roślin do stresu środowiskowego. Ich badania nad trzema populacjami *Lilium bosniacum*, rosnących w różnorodnych siedliskach, w tym serpentynitowych, dowodzą, że to epigenetyka odegrała główną rolę w zróżnicowaniu populacji rosnących w warunkach stresowych. Gulli i in. (2018) twierdzą, że takie epigenetyczne modyfikacje mogą stanowić strategię obrony, która zapobiega niestabilności genomu i bezpośredniemu uszkodzeniu struktury DNA przez jony Ni, umożliwiając roślinom przetrwanie w ekstremalnym środowisku. Autorzy, jak podają, dostarczyli pierwszych dowodów na udział zmian epigenetycznych w odpowiedzi na wysoką zawartość Ni w liściach roślin.

Oslabianie toksyczności niklu przez wysokie koncentracje magnezu w glebach serpentynitowych dowodzi ciekawej sytuacji, w której te dwa składniki kompleksu serpentynitowego wzajemnie osłabiają swoje niekorzystne oddziaływanie na rośliny.

Nie wszystkie obserwowane tendencje w doświadczeniach z *Euphorbia cyparissias* i *Galium verum* zostały potwierdzone testami statystycznymi. Jednak zarówno te udowodnione, jak i zarysowujące się, lecz w tych badaniach niepotwierdzone statystycznie,

są warte pogłębionych studiów. Otwarte pozostaje pytanie, czy silniejsza reakcja na działanie, detoksykujące nikiel, wysokich koncentracji magnezu jest utrwalonym genetycznie przystosowaniem, czy przejawem plastyczności fenotypowej populacji serpentynitowych.

### **6.3.2 Wzrost i pobieranie składników mineralnych przez rośliny uprawiane na glebach serpentynitowej i granitowej**

Doświadczenie prowadzone w szklarni miało stanowić uzupełnienie eksperymentu w kulturach wodnych. Testowano tolerancję populacji serpentynitowych oraz nieserpentynitowych na specyficzne właściwości edaficzne siedlisk serpentynitowych. Uprawa roślin w glebie pozwoliła na sprawdzenie reakcji badanych roślin nie tylko na właściwości chemiczne, jak w pierwszym doświadczeniu, ale i fizyczne gleby. Założenie o odmienności reakcji pomiędzy populacjami wilczomlecza sosnki oraz przytulii właściwej, pochodzącymi z serpentynitów i granitów na właściwości obu podłoży nie zostało potwierdzone. Westerbergh (1994) przedstawiła podobne obserwacje na podstawie badań nad populacją serpentynitową i nieserpentynitową *Silene dioica*. Zarówno osobniki przytulii właściwej jak i wilczomlecza sosnki rozwijały się na badanych glebach prawidłowo, nie wykazując symptomów deficytu składników pokarmowych lub toksycznego działania metali ciężkich. Tempo wzrostu osobników wszystkich populacji obu gatunków w prezentowanym doświadczeniu było podobne. Jest to sprzeczne z doniesieniami o wolniejszym wzroście populacji serpentynitowych, który jest wyrazem adaptacji osobników serpentynitowych do niekorzystnych warunków siedliskowych (Proctor 1971, Maars i Proctor 1976, Freitas i Mooney 1996). Proctor (1971) badając gleby serpentynitowe z różnych miejsc świata wykazał, że każda z badanych gleb miała swoją specyfikę i w odmienny sposób oddziaływała na badane rośliny. Niewątpliwie, jego doświadczenia potwierdziły niekorzystny wpływ gleb serpentynitowych na rośliny, który ujawniał się m.in. poprzez karłowaty wzrost, chlorozy wynikające z niedoborów podstawowych składników pokarmowych lub redukcję powierzchni blaszki liściowej, a nawet zamieranie roślin. Kruckeberg (m.in. 1954, 1967) w swoich badaniach nad gatunkami roślin o szerokim spektrum występowania (typu *bodenvag*) z obszaru Stanów Zjednoczonych odnotował wyraźne różnice reakcji między populacjami naturalnie występującymi na różnych podłożach skalnych. Potwierdził tym samym istnienie ras serpentynitowych i nieserpentynitowych w obrębie badanych gatunków. O'Dell i Claassen (2006) także

wykazali przystosowanie populacji serpentynitowej *Achillea millefolium* do tego podłoża, czego nie zaobserwowali u pozostałych dwóch pochodzących z odmiennych gleb. Nie wykształciły one nawet prawidłowo rozwiniętych siewek na glebie serpentynitowej. W tej pracy nie odnotowano takiej tendencji, zarówno populacje granitowe jak i serpentynitowe podobnie rosły i rozwijały się w obu rodzajach podłoży.

W opisywanym w tej pracy doświadczeniu rośliny nie różniły się od siebie także pod względem przyrostu oraz akumulacji biomasy pędów. Również Kayama i Koike (2015) nie wykazali różnic w przyroście biomasy dwóch gatunków brzozy. U obu gatunków uprawianych na glebie serpentynitowej nastąpiła redukcja biomasy oraz obniżenie wskaźników fotosyntezy. Proctor (1971) także stwierdził wyraźną redukcję biomasy u owsa uprawianego w podłożach serpentynitowych, w skrajnych przypadkach aż ponad pięćdziesięciokrotną w stosunku do warunków kontrolnych. Ponadto Kayama i in. (2005) wykazali spadek biomasy siewek u dwóch gatunków świerka uprawianych na glebie serpentynitowej, natomiast nie odnotowali tego w przypadku *Picea glehnii*, naturalnie występującego w składzie roślinności serpentynitowej. Zaznaczyła się więc różnica w reakcji populacji na rodzaj podłoża, czego nie zaobserwowano w niniejszych badaniach. Wspomniani już O'Dell i Claassen (2006) wykazali u krwawnika pospolitego istotnie wyższą produkcję biomasy korzeni i pędów u ekotypu serpentynitowego w porównaniu do granitowego w uprawie na podłożu serpentynitowym.

Przyczyną braku reakcji populacji o różnym pochodzeniu może być stosunkowo wysoka zawartość wapnia w glebie serpentynitowej użytej w doświadczeniu. Według Kruckeberga (1954) odporność na niskie stężenia wapnia w podłożu stanowią nadrzędną cechę adaptacyjną do siedlisk serpentynitowych. Stres, wywołany niedoborem wapnia mógłby zadziałać selekcyjnie i ujawnić ekotypy serpentynitowe i nieserpentynitowe u przytulii i wilczomlecza. Ponadto proporcja między magnezem i wapniem w glebie serpentynitowej wykorzystanej w doświadczeniu była bliska równowagi (por. tab. 3), a więc nasilenie tego składnika kompleksu serpentynitowego było umiarkowane.

Reakcja gatunków uprawianych na odmiennych podłożach w doświadczeniu szklarniowym dotyczyła jedynie różnic w kumulacji składników, zwłaszcza tych charakterystycznych dla gleb serpentynitowych, tj. magnezu, wapnia, niklu i chromu. Wilczomleczeńka i przytulia właściwa kumulowały istotnie więcej tych pierwiastków, rosnąc na podłożu serpentynitowym. Podobne wyniki uzyskali Kayama i Koike (2015), którzy badali reakcję dwóch gatunków brzozy, z czego jedna występowała naturalnie na

serpentynitach północnej Japonii. Oba gatunki uprawiane na glebie serpentynitowej miały istotnie wyższe zawartości wymienionych składników w porównaniu do rosnących na glebach kontrolnych. W niniejszej pracy, zasadniczo, nie stwierdzono różnic między populacjami w pobieraniu metali. Odmienne zareagowała jedna z populacji serpentynitowych *E. cyparissias*, kumulując istotnie mniej niklu od pozostałych. Podobnie Remon i in. (2007) wykazali, że populacje serpentynitowe *Plantago arenaria* przejawiały wyższą tolerancję na nikiel i kumulowały mniej tego metalu, zarówno w pędach jak i korzeniach, w porównaniu do populacji nieserpentynitowych. Z kolei Kubicka i in. (2015) nie wykazali różnic w zawartości niklu w kłęczach i liściach u *Pteridium aquilinum* między populacjami granitową i serpentynitową poddanych różnym dawkom tego metalu w uprawie glebowej. Jednak zawartość chromu była wyższa u tej z serpentynitów w cytowanej pracy, czego natomiast nie zaobserwowano ani u wilczomlecza ani u przytulii w tej pracy. Autorzy tłumaczą brak różnic w kumulowaniu niklu przez odmienne populacje tego gatunku plastycznością fenotypową w adaptacji do ekstremalnych siedlisk. Niższe zawartości metali ciężkich w tkankach roślin mogą świadczyć o mechanizmach ograniczających ich pobieranie. Rośliny narażone na ekspozycję metali mogły wykształcić szereg zmian adaptacyjnych zwiększających tolerancję na zastane czynniki stresowe, o czym wspomniano we wcześniejszym rozdziale (por. rozdz. 6.3.1).

Doświadczenie wazonowe nie wykazało różnic w reakcji osobników populacji serpentynitowych i nieserpentynitowych wilczomlecza sosnki oraz przytulii właściwej na specyficzne właściwości edaficzne siedlisk serpentynitowych. Być może właściwości gleby serpentynitowej, w której uprawiano rośliny nie stanowiły na tyle mocnych czynników stresowych, aby wykazać odrębność odmian serpentynitowej i nieserpentynitowej u badanych gatunków. Można spekulować również, że pominięty czynnik związany z nieurodzajnością gleb serpentynitowych, a mianowicie niedobór wody, odegrałby istotną rolę w rozróżnieniu odpowiedzi osobników granitowych i serpentynitowych na czynniki kompleksu serpentynitowego. Proctor i Nagy (1993) podają przykłady doświadczeń, w których gleba serpentynitowa nie wykazywała toksycznego wpływu na rośliny, dopiero w warunkach suszy był on dostrzegalny. W oparciu o poznaną literaturę nasuwa się wniosek o pewnych ograniczeniach badań prowadzonych *ex situ*. Trudno jest odtworzyć szereg czynników, które oddziałują na roślinność w naturalnym środowisku.

## 7. Podsumowanie wyników i wnioski

1. Parametry fizyczno-topograficzne słabiej separowały badane powierzchnie na murawach niż parametry geochemiczne, zwłaszcza te związane z właściwościami gleb serpentynitowych. Wzdłuż gradientów koncentracji metali takich jak magnez, nikiel, kobalt, żelazo i chrom, wyróżniających siedliska serpentynitowe, wyraźnie oddzielały się powierzchnie serpentynitowe od pozostałych. Z kolei powierzchnie granitowe oraz wapienne separowały się na tle gradientów odczynu gleb oraz zawartości wymiennych jak i całkowitych wapnia.
2. Zawartości wymienne wapnia oraz wysokość hipsometryczna badanych siedlisk w najwyższym stopniu różnicowały roślinność badanych siedlisk, zarówno w analizie zmiennych jako efekty marginalne jak i warunkowe. Zawartości wymiennych form magnezu, niklu oraz manganu, a także azotu całkowitego okazały się istotne w obu przypadkach. Można zatem dostrzec silny wpływ czynników specyficznych dla siedlisk serpentynitowych oraz wapiennych. Odczyn gleby był obok wapnia czynnikiem najsilniej różnicującym roślinność, jednak istotnym tylko jako niezależna zmienna, w ujęciu warunkowym nie wykazano jego istotności.
3. Siedliska muraw kserotermicznych na odmiennych podłożach geologicznych wykazywały znaczne podobieństwo parametrów fizyko-chemicznych mimo istotnych różnic właściwości geochemicznych. Wydaje się zatem, że podobieństwo właściwości fizyko-chemicznych decyduje o podobieństwie fizjonomii, parametrów różnorodności gatunkowej i kompozycji gatunkowej muraw na trzech badanych podłożach geologicznych, przejawiającym się m.in. wysokim udziałem wspólnych gatunków.
4. Roślinność badanych siedlisk nie wykazywała istotnego statystycznie zróżnicowania pod względem liczby gatunków oraz współczynników różnorodności ( $H'$ ) i równocенności ( $J'$ ) Shannona-Wienera jak również biomasy roślin. Jedynym badanym parametrem, który różnicował powierzchnie wykształcone na odmiennych podłożach geologicznych, było zwarcie warstwy zielonej badanych powierzchni. Powierzchnie na murawach wapiennych z obszaru Gór Kaczawskich odznaczały się najwyższym współczynnikiem  $H'$  i równocześnie najwyższą liczebnością gatunkową. Mimo braku istotnych różnic średnich wartości współczynnika różnorodności Shannona-Wienera pomiędzy badanymi obiektami, izolinie tego

wskaźnika pokazują czytelne zróżnicowanie w przestrzeni ordynacyjnej CCA. Jego wartości obniżają się od powierzchni na wapieniach wzdłuż pierwszej osi CCA, a następnie od siedlisk granitowych po serpentynitowe zgodnie z rosnącymi wartościami drugiej osi.

5. Najuboższe i najmniej różnorodne były niektóre murawy serpentynitowe z okolic Przemysłowa, Gogołowa oraz Szklar, dla których H' miał najniższe wartości. Układ tych powierzchni względem dwóch pierwszych osi kanonicznych CCA wskazywał na wysokie zawartości magnezu, niklu oraz pozostałych metali ciężkich w glebach, decydujących o nasileniu kompleksu serpentynitowego.
6. W kanonicznej analizie zgodności (CCA) spośród badanych podłoży najsilniej wyodrębnia się roślinność muraw nawapiennych, o czym decyduje zasobność w wapń, związany z tym odczyn i wysokość hipsometryczna. Słabiej zróżnicowane względem siebie są murawy z granitów i serpentynitów. O różnicach pomiędzy nimi decydują skorelowane z drugą osią CCA czynniki specyficzne dla siedlisk serpentynitowych – wysokie koncentracje magnezu i niklu.
7. Przytulnia właściwa *Galium verum* L., macierzanka zwyczajna *Thymus pulegioides* L. i kostrzewa walezyjska *Festuca valesiaca* agg. wykazywały istotne statystycznie reakcje na gradienty czynników współtworzących kompleks serpentynitowy, tj. zawartości magnezu i wapnia, wartości stosunku tych pierwiastków oraz zawartości niklu. Co więcej, zaobserwowano silną dodatnią reakcję *Thymus pulegioides* L. zarówno na wysokie zawartości magnezu i wynikające z tego wartości stosunku Mg/Ca, jak i wysokie koncentracje niklu wymiennego.
8. Typ podłoża skalnego istotnie wpływał na akumulację makro- i mikrośladników pokarmowych oraz pierwiastków śladowych przez gatunki ciepłolubnych muraw. Wykazano wyższe koncentracje magnezu i niklu oraz wartości stosunku Mg/Ca w nadziemnych częściach u badanych gatunków z siedlisk serpentynitowych w porównaniu do pozostałych podłoży. Analizy wielozmienne także potwierdziły decydującą rolę zawartości niklu i magnezu w pędach roślin w różnicowaniu powierzchni, jedynie u *Thymus pulegioides* kobalt najsilniej różnicował badane powierzchnie, a po nim nikiel, wapń oraz magnez. Najwyższą zdolność do gromadzenia niklu w nadziemnych częściach roślin zaobserwowano u wilczomlecza

sosnki *Euphorbia cyparissias*, u którego osobniki ze stanowisk serpentynitowych kumulowały nawet do 254 mg Ni kg<sup>-1</sup> s.m.

9. W doświadczeniu prowadzonym w kulturach wodnych porównywano reakcje populacji serpentynitowych i pochodzących z granitów *Euphorbia cyparissias* L. i *Galium verum* L. na dodatek niklu przy zmiennych wartościach stosunku Mg/Ca. Podczas gdy nie stwierdzono oznak tolerancji na nikiel przy zrównoważonym stosunku Mg/Ca, to u obu badanych gatunków wystąpiły symptomy detoksykacji niklu pod wpływem rosnących wartości stosunku Mg/Ca. Efekt ten był wyraźniejszy w populacjach serpentynitowych, szczególnie u wilczomlecz sosnki. Wyniki dowodzą wzajemnego znoszenia się działania na rośliny dwóch istotnych geochemicznych składników kompleksu serpentynitowego – wysokich, potencjalnie toksycznych koncentracji magnezu i niklu.
10. Zróżnicowanie reakcji populacji serpentynitowych i granitowych gatunków uprawianych na odmiennych podłożach w doświadczeniu wazonowym dotyczyła jedynie różnicy w akumulacji składników, zwłaszcza tych charakterystycznych dla gleb serpentynitowych, tj. magnezu, wapnia, niklu i chromu. Nie potwierdzono jednak założenia o odmienności reakcji pomiędzy populacjami pochodzącymi z serpentynitów i granitów na właściwości chemiczne obu podłoży. Nie stwierdzono istotnych różnic w akumulowaniu pierwiastków pomiędzy populacjami serpentynitowymi oraz granitowymi *Galium verum* L. i *Euphorbia cyparissias* L. rosnących na obu typach gleb w warunkach doświadczalnych.
11. Wilczomlecz sosnka *Euphorbia cyparissias* L. na siedliskach serpentynitowych odznaczał się na tle innych gatunków wyjątkowo wysoką zdolnością gromadzenia niklu w tkankach, a także tolerancją na ten pierwiastek w warunkach oddziaływania wysokich koncentracji magnezu. Gatunek z pewnością zasługuje na dalsze pogłębione badania w celu ustalenia, czy obserwowane właściwości są adaptacjami do warunków siedlisk serpentynitowych i czy te przystosowania są genetycznie utrwalone, a tym samym mogą stanowić podstawę do wyodrębnienia ekotypów związanych z tym szczególnym typem siedlisk.
12. Uzyskane wyniki badań wskazują w porównaniu z doniesieniami literatury, że dolnośląskie siedliska ciepłolubnych muraw na serpentynitach ogólnie odznaczają się umiarkowanym natężeniem czynników kompleksu serpentynitowego. Czynniki



te nadają specyficzny rys tym ekosystemom, jednak ich charakter nie jest radykalnie odmienny od analogicznych muraw z wapieni i granitów. Specyfika ta wyraża się przede wszystkim szczególnym składem mineralnym roślin będącym odbiciem nietypowych właściwości geochemicznych gleb. Zróżnicowane reakcje populacji serpentynitowych, przynajmniej u *Euphorbia cyparissias* L., mogą być jednak przesłanką do przyjęcia założenia, że główne czynniki kompleksu serpentynitowego ograniczają rozwój roślin, wymuszając na nich wytwarzanie adaptacji. Otwiera to perspektywę do planowania interesujących badań w przyszłości.

## 8. Literatura

- Aćić S., Šilc U., Petrović M., Tomović G., Dajić Stevanović Z. 2015. Classification, ecology and biodiversity of Central Balkan dry grasslands. *Tuexenia* 35: 329–353.
- Adamidis G.C., Kazakou E., Baker A.J.M., Reeves R.D., Dimitrakopoulos P.G. 2014. The effect of harsh abiotic conditions on the diversity of serpentine plant communities on Lesbos, an eastern Mediterranean island. *Plant Ecology & Diversity* 7(3): 433–444.
- Alegro A.L., Šoštarić R. 2006. Morphometric characteristics within *Festuca valesiaca* agg. (*Poaceae - Poeae*) in Istria and the status of the *F. illyrica* MARKGR.-DANN. *Phyton* (Horn, Austria) 46(1): 113–128.
- Alekseeva-Popova N.V., Drozdova I.V., Kalimova I.B. 2015. Accumulation of heavy metals by North Caucasian plant species of the *Cruciferae* family in regards to phytoremediation. *Geochemistry International* 53(5): 456–463.
- Alexander E.B. 2009. Soil and vegetation differences from peridotite to Serpentinite. *Northeast Nat* 16(5): 178–192.
- Allen S.E. (ed.). 1989. Chemical analysis of ecological materials. Second edition completely revised. Blackwell Scientific Publications, Oxford, England, Boston, 368 pp.
- Arndt S. 2008. Novelties in the *Festuca valesiaca* group (*Poaceae*) from the central Alps. *Pl Syst Evol* 271: 129-142.
- Asemaneh T., Ghaderian S.M., Baker A.J.M. 2007. Responses to Mg/Ca balance in an Iranian serpentine endemic plant, *Cleome heratensis* (*Capparaceae*) and a related non-serpentine species, *C. foliolosa*. *Plant Soil* 293: 49–59.
- Asemaneh T., Ghaderian S.M., Crawford S.A.T., Marshall A., Baker A.J.M. 2006. Cellular and subcellular compartmentation of Ni in the Eurasian serpentine plants *Alyssum bracteatum*, *Alyssum murale* (*Brassicaceae*) and *Cleome heratensis* (*Capparaceae*). *Planta* 225:193–202.
- Baker A.J.M. 1981. Accumulators and excluders strategies in response of plants to heavy metals. *Journal of Plant Nutrition* 3(1–4): 643–654.
- Becker T., Brändel M. 2007. Vegetation-environment relationships in a heavy metal-dry grassland complex. *Folia Geobotanica*, 42(1): 11–28.
- Bani A., Echevarria G., Montargès-Pelletier E., Gjoka F., Sulçe S., Morel J.L. 2014. Pedogenesis and nickel biogeochemistry in a typical Albanian ultramafic toposequence. *Environ Monit Assess* 186: 4431–4442.

- Bini C., Maleci L., Wahsha M. 2017. Potentially toxic elements in serpentine soils and plants from Tuscany (Central Italy). A proxy for soil remediation. *Catena* 148: 60–66.
- Bonari G., Monaci F., Nannoni F., Angiolini C., Protano G. 2019. Trace element uptake and accumulation in the medicinal herb *Hypericum perforatum* L. across different geolithological settings. *Biological Trace Element Research* 189: 267–276.
- Bradshaw Jr.H.D. 2005. Mutations in CAX1 produce phenotypes characteristic of plants tolerant to serpentine soils. *New Phytologist* 167: 81–88.
- Brady K.U., Kruckeberg A.R., Bradshaw H.D.Jr. 2005. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 36: 243–266.
- Bratteler M., Widmer A., Baltisberger M., Edwards P.J. 2002. Genetic architecture of traits associated with habitat adaptation in *Silene vulgaris* (*Caryophyllaceae*). *Bulletin of the Geobotanical Institute ETH* 68: 95–103.
- Brković D.L., Tomović G.M., Niketić M.S., Lakušić D.V. 2015. Diversity analysis of serpentine and non-serpentine flora – or, is serpentinite inhabited by a smaller number of species compared to different rock types? *Biologia, Section Botany* 70(1): 61–74.
- Broadhurst C.L., Chaney R.L. 2016. Growth and metal accumulation of an *Alyssum murale* Nickel hyperaccumulator ecotype Co-cropped with *Alyssum montanum* and Perennial Ryegrass in serpentine soil. *Front. Plant Sci.* 7: 451.
- Broda B., Mowszowicz J. 1996. Przewodnik do oznaczania roślin leczniczych, trujących i użytkowych. Wyd. V. Wyd. Lekarskie PZWL, Warszawa, 894 pp.
- Brooks R.R. 1987. Chapter 4: The serpentine factor. W: *Serpentine and its vegetation: A multidisciplinary approach*. Dioscorides Press, Portland, Oregon, 32–59.
- Bruun H.H., Ejrnaes R. 2000. Classification of dry grassland vegetation in Denmark. *Journal of Vegetation Science* 11: 585–596.
- Cachovanová, L., Hájek, M., Fajmonová, Z., Marrs R. 2012. Species Richness, Community Specialization and Soil-Vegetation Relationships of Managed Grasslands in a Geologically Heterogeneous Landscape. *Folia Geobot* 47: 349–371.
- Chardot V., Echevarria G., Gury M., Massoura S., Moreli J.L. 2007. Nickel bioavailability in an ultramafic toposequence in the Vosges Mountains (France). *Plant Soil* 293: 7–21.

- Chytrý M., Tichý L., Roleček J. 2003. Local and regional patterns of species richness in Central European vegetation types along the pH/calcium gradient. *Folia Geobot* 38: 429–442.
- D'Amico M.E., Previtali F. 2012. Edaphic influences of ophiolitic substrates on vegetation in the Western Italian Alps. *Plant Soil* 351: 73–95.
- Deng T.-H.-B., van der Ent A., Tang Y.-T., Sterckeman T., Echevarria G., Morel J.-L., Qiu R.-L. 2018. Nickel hyperaccumulation mechanisms: a review on the current state of knowledge. *Plant Soil* 423: 1–11.
- Dengler J., Becker T., Ruprecht E., Szabó A., Becker U., Beldean M., Bită-Nicolae C., Dolnik Ch., Goia I., Peyrat J., Sutcliffe L.M.E., Turtureanu P.D., Uğurlu E. 2012. *Festuco-Brometea* communities of the Transylvanian Plateau (Romania) – a preliminary overview on syntaxonomy, ecology, and biodiversity. *Tuexenia* 32: 319–359.
- Doherty J.H., Ji B., Casper B.B. 2008. Testing nickel tolerance of *Sorghastrum nutans* and its associated soil microbial community from serpentine and prairie soils. *Environmental Pollution* 151: 593–598.
- Drozd J., Licznar M., Licznar S.E., Weber J. 2002. *Gleboznawstwo z elementami mineralogii i petrografii*. Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu, 210 pp.
- Dúbravková D., Chytrý M., Willner W., Illyés E., Janišová M., Kállayné Szerényi J. 2010. Dry grasslands in the Western Carpathians and the northern Pannonian Basin: a numerical classification. *Preslia* 82: 165–221.
- Dúbravková D., Košťál J. 2012. Acidophilous dry grasslands on the quartzite bedrock in Western Slovakia. *Hacquetia* 11(2): 249–269.
- Dzwonko Z., Loster S. 2008. Changes in plant species composition in abandoned and restored limestone grasslands – the effects of tree and shrub cutting. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae* 77(1): 67–75.
- Ejrnæs R., Bruun H.H. 2000. Gradient analysis of dry grassland vegetation in Denmark. *Journal of Vegetation Science* 11: 573–584.
- Ellenberg H., Düll R., Wirth V., Werner., Paulißen D. 1992. *Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa*. Scripta Geobotanica 18, 2 Auflage, Verlag Erich Goltze KG, Göttingen, 248 pp.
- Ewald J. 2003. The Calcareous Riddle: Why are there so many calciphilous species in the Central European flora? *Folia Geobotanica* 38(4): 357–366.

- Freitas H., Mooney H. 1996. Effects of water stress and soil texture on the performance of two *Bromus hordeaceus* ecotypes from sandstone and serpentine soils. *Acta Oecologica* 17(4): 307–317.
- Galey M.L., van der Ent A., Iqbal M.C.M., Rajakaruna N. 2017. Ultramafic geocology of South and Southeast Asia. *Bot Stud* 58: 18. DOI 10.1186/s40529-017-0167-9
- Ghasemi R., Zare Chavoshi Z., Boyd R.S., Rajakaruna N. 2014. A preliminary study of the role of nickel in enhancing flowering of the nickel hyperaccumulating plant *Alyssum inflatum* Nyár. (*Brassicaceae*). *South African Journal of Botany* 92: 47–52.
- Głowicki B., Otop I., Urban G., Tomczyński K. 2005. *Klimat*. W: Blachowski J., Markowicz-Judycka E., Zięba D (red.) *Opracowanie ekofizjograficzne dla Województwa Dolnośląskiego*. Wojewódzkie Biuro Urbanistyczne we Wrocławiu. [http://www.eko.wbu.wroc.pl/eko/index.php?option=com\\_frontpage&Itemid=1](http://www.eko.wbu.wroc.pl/eko/index.php?option=com_frontpage&Itemid=1) [27.03.2019].
- Gonet S., Smal H., Chojnicki J. 2015. *Właściwości chemiczne gleb*. W: Mocek A. (red.) *Gleboznawstwo*. Wydawnictwo Naukowe PWN SA. Wyd. 1, Warszawa, 189–226.
- Gullì M., Marchi L., Fragni R., Buschini A., Visioli G. 2018. Epigenetic modifications preserve the hyperaccumulator *Noccaea caerulescens* from Ni geno-toxicity. *Environmental and Molecular Mutagenesis*. DOI 10.1002/em.
- Hassan M.U., Chattha M.U., Khan I., Chattha M.B., Aamer M., Nawaz M., Ali A., Khan M.A.U., Khan T.A. 2019. Nickel toxicity in plants: reasons, toxic effects, tolerance mechanisms, and remediation possibilities—a review. *Environmental Science and Pollution Research* 26: 12673–12688.
- Hawkesford M., Horst W., Kichey T., Lambers H., Schjoerring J., Skrumsager Møller I., White P. 2012. *Functions of Macronutrients*. W: Marschner P. (ed.) *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press, Third edition, 135–178. [https://books.google.pl/books?hl=pl&lr=&id=yqKV3USG41cC&oi=fnd&pg=PP1&dq=marschner&ots=Vc3DY2CYzf&sig=ZG1coZcw8svQioA8TIY\\_ab3mbaE&redir\\_esc=y#v=onepage&q=marschner&f=false](https://books.google.pl/books?hl=pl&lr=&id=yqKV3USG41cC&oi=fnd&pg=PP1&dq=marschner&ots=Vc3DY2CYzf&sig=ZG1coZcw8svQioA8TIY_ab3mbaE&redir_esc=y#v=onepage&q=marschner&f=false) [30.12.2020 oraz 13.01.2021].
- Hejzman M., Hejzmanová P., Pavlů V., Beneš J. 2013. Origin and history of grasslands in Central Europe – a review. *Grass and Forage Science* 68: 345–363.
- Hoagland D.R., Arnon D.I. 1950. The water-culture method for growing plants without soil. *Circular*. California Agricultural Experiment Station 347.

- Jakovljević K., Đurović S., Antušević M., Mihailović N., Buzurović U., Tomović G. 2019. Heavy metal tolerance of *Pontechium maculatum* (*Boraginaceae*) from several ultramafic localities in Serbia. *Botanica Serbica* 43(1): 73–83.
- Jenny H. 1980. The soil resource: origin and behavior. *Ecol Stud* 37: 256–259.
- Jongman R.H.G., ter Braak C.J.F., van Tongeren O.F.R. (eds). 1987. Data analysis in community and landscape ecology. Pudoc. Wageningen, 295 pp.
- Kabata-Pendias A., Mukherjee A.B. 2007. W: Trace Elements from Soil to Human. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 550 pp.
- Kabata-Pendias A., Pendias H. 1993. Biogeochemia pierwiastków śladowych. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 364 pp.
- Kabata-Pendias A., Pendias H. 2001. Trace elements in soils and plants. CRC Press LLC, 3rd ed. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C., 331 pp.
- Kącki Z., Dajdok Z., Szczęśniak E. 2003. Czerwona lista roślin naczyniowych Dolnego Śląska. W: Kącki Z. (red) Zagrożone gatunki flory naczyniowej Dolnego Śląska. Instytut Biologii Roślin, Uniwersytet Wrocławski. Polskie Towarzystwo Przyjaciół Przyrody „Pro Natura”, Wrocław, 15–19.
- Karczewska A., Kabała C. 2008. Metodyka analiz laboratoryjnych gleb i roślin. Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Instytut Nauk o Glebie o Ochrony Środowiska, Zakład Ochrony Środowiska Wyd. 4, Wrocław, 45 pp.
- Kataeva M.N., Alexeeva-Popova N.V., Drozdova I.V., Beljaeva A.I. 2004. Chemical composition of soils and plant species in the Polar Urals as influenced by rock type. *Geoderma* 122: 257–268.
- Kayama M., Koike T. 2015. Differences in growth characteristics and dynamics of elements in seedlings of two birch species grown in serpentine soil in northern Japan. *Trees* 29: 171–184.
- Kayama M., Quoreshi A.M., Uemura S., Koike T. 2005. Differences in growth characteristics and dynamics of elements absorbed in seedlings of three spruce species raised on serpentine soil in Northern Japan. *Annals of Botany* 95: 661–672.
- Kazakou E., Adamidis G.C., Baker A.J.M., Reeves R.D., Godino M., Dimitrakopoulos P.G. 2010. Species adaptation in serpentine soils in Lesbos Island (Greece): metal hyperaccumulation and tolerance. *Plant Soil* 332: 369–385.

- Kierczak J., Neel C., Bril H., Puziewicz J. 2007. Effect of mineralogy and pedoclimatic variations on Ni and Cr distribution in serpentine soils under temperate climate. *Geoderma* 142: 165–177.
- Kierczak J., Pędziwiatr A., Waroszewski J., Modelska M. 2016. Mobility of Ni, Cr and Co in serpentine soils derived on various ultrabasic bedrocks under temperate climate. *Geoderma*, 268: 78–91.
- Kierczak J., Pietranik A., Pędziwiatr A. 2021. Ultramafic geoecosystems as a natural source of Ni, Cr, and Co to the environment: A review. *Science of the Total Environment* 755: 142620.
- Kondracki J. 2001. *Geografia regionalna Polski*. Wyd. PWN, Warszawa, 216–222; 243–248.
- Kovach Computing Services. 2004. MVSP v 3. 131.
- Kruckeberg A.R. 1951. Intraspecific variability in the response of certain native plant species to serpentine soil. *American Journal of Botany* 38: 408–419.
- Kruckeberg A.R. 1954. The ecology of serpentine soils. III. Plant species in relation to serpentine soils. *Ecology* 35(2): 267–274.
- Kruckeberg A.R. 1967. Ecotypic response to ultramafic soils by some plant species of northwestern United States. *Brittonia* 19: 133–151.
- Kubicka K., Samecka-Cymerman A., Kolon K., Kosiba P., Kempers A.J. 2015. Chromium and nickel in *Pteridium aquilinum* from environments with various levels of these metals. *Environ Sci Pollut Res*, 22: 527–534.
- Kwiatkowski P. 2006a. Environmental conditions of the Góry Kaczawskie and Pogórze Kaczawskie. W: Current state, separateness and dynamics of vascular flora of the Gory Kaczawskie (Kaczawa Mountains) and Pogorze Kaczawskie (Kaczawa Plateau). I. Distribution atlas of vascular plants, W. Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Sciences, Kraków, 12–25.
- Kwiatkowski P. 2006b. Current state, separateness and dynamics of vascular flora of the Gory Kaczawskie (Kaczawa Mountains) and Pogorze Kaczawskie (Kaczawa Plateau). II. Phytogeographical analysis, W. Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Sciences, Kraków, 206 pp.
- Lešková A., Zwarlık M., Araya T., Giehl R.F.H. 2020. Nickel toxicity targets cell wall-related processes and PIN2-mediated auxin transport to inhibit root elongation and gravitropic responses in *Arabidopsis*. *Plant Cell Physiol.* 61(3): 519–535.

- Licina V., Antic-Mladenovic S., Kresovic M., Rinklebe J. 2010. Effect of High Nickel and Chromium Background Levels in Serpentine Soil on Their Accumulation in Organs of a Perennial Plant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 41: 482–496.
- Lombini A., Llugany M., Poschenrieder Ch., Dinelli E., Barceló J., 2003. Influence of the Ca/Mg ratio on Cu resistance in three *Silene armeria* ecotypes adapted to calcareous soil or to different, Ni- or Cu-enriched, serpentine sites. *J. Plant Physiol.* 160: 1451–1456.
- Losfeld G., Mathieu R., L’Huillier L. Fogliani B., Jaffré T., Grison C. 2015. Phytoextraction from mine spoils: insights from New Caledonia. *Environ Sci Pollut Res* 2: 5608–5619.
- Majerowicz A. 1979. Surowce skalne: Granity Masywu Strzegom-Sobótka. W: Dziedzic K., Kozłowski S., Majerowicz A., Sawicki L. (red.) Surowce mineralne Dolnego Śląska. Zakład Narodowy im. Ossolińskich, Wrocław, 207–211.
- Maars R.H., Proctor J. 1976. The response of serpentine and non-serpentine *Agrostis stolonifera* to magnesium and calcium. *The Journal of Ecology* 64(3): 953–964.
- Malpas J. 1992. Serpentine and geology of serpentinized rocks. W: Roberts B.A. i Proctor J. (eds) *The ecology of areas with serpentinized rocks. A world view.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 7–30. [https://books.google.pl/books?hl=pl&lr=&id=Abb1CAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR1&dq=The+ecology+areas+with+serpentinized+rocks&ots=iVgTsEamgc&sig=p8uVNMG9i0RS\\_spfpKj6YL8v-0k&redir\\_esc=y#v=onepage&q=The%20ecology%20areas%20with%20serpentinized%20rocks&f=false](https://books.google.pl/books?hl=pl&lr=&id=Abb1CAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR1&dq=The+ecology+areas+with+serpentinized+rocks&ots=iVgTsEamgc&sig=p8uVNMG9i0RS_spfpKj6YL8v-0k&redir_esc=y#v=onepage&q=The%20ecology%20areas%20with%20serpentinized%20rocks&f=false) [27.11.2020].
- Marescotti P., Comodi P., Crispini L., Gigli L., Zucchini A., Fornasaro S. 2019. Potentially toxic elements in ultramafic soils: a study from metamorphic ophiolites of the Voltri Massif (Western Alps, Italy). *Minerals* 9: 502.
- Matuszkiewicz W. 2008. Przewodnik do oznaczania zbiorowisk roślinnych Polski. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 531 pp.
- McCune B. 2007. Improved estimates of incident radiation and heat load using non-parametric regression against topographic variables. *J. Veg. Sci.* 18: 751–754.
- McCune B., Keon D. 2002. Equations for potential annual direct incident radiation and heat load. *J. Veg. Sci.* 13: 603–606.



- Merunková K., Chytrý M. 2012. Environmental control of species richness and composition in upland grasslands of the southern Czech Republic. *Plant Ecol* 213: 591–602.
- Migoń P., Kasprzak M. 2015. Regiony fizycznogeograficzne. W: Żelaźniewicz A. (red) *Przyroda Dolnego Śląska*. Wyd. II. Polska Akademia Nauk, Oddział we Wrocławiu, Wrocław, 19–36.
- Mirek Z., Piękoś-Mirkowa H., Zając A., Zając M. 2002. Vascular plants and pteridophytes of Poland. A checklist. <http://bomax.botany.pl/ib-db/check/> [07.03.2019].
- Mišljenović T., Jakovljević K., Jovanović S., Mihailović N., Gajić B., Tomović G. 2018. Micro-edaphic factors affect intra-specific variations in trace element profiles of *Nocca praecox* on ultramafic soils. *Environmental Science and Pollution Research* 25: 31737–31751.
- Muszyńska E., Labudda M., Różańska E., Hanus-Fajerska E., Koszelnik-Leszek A. 2019. Structural, physiological and genetic diversification of *Silene vulgaris* ecotypes from heavy metal-contaminated areas and their synchronous *in vitro* cultivation. *Planta* 249: 1761–1778.
- Niedźwiedzki R., Szulc J., Zarankiewicz M. 2012. Kamienne Skarby Ziemi Annogórskiej: przewodnik geologiczny. Wyd. Stowarzyszenie Kraina św. Anny, Krapkowice, 3–16.
- Nowak A. 2004. Charakterystyka szaty roślinnej Śląska Opolskiego. W: Nowak A., Spałka K. (red.) *Ochrona szaty roślinnej Śląska Opolskiego*. Wyd. Uniwersytetu Opolskiego, Opole, 37–60.
- Nyberg Berglund A.-B., Dahlgren S., Westerbergh A. 2003. Evidence for parallel evolution and site-specific selection of serpentine tolerance in *Cerastium alpinum* during the colonization of Scandinavia. *New Phytologist* 161: 199–209.
- O'Dell R.E., Claassen V.P. 2006. Serpentine and nonserpentine *Achillea millefolium* accessions differ in serpentine substrate tolerance and response to organic and inorganic amendments. *Plant and Soil* 279: 253–269.
- Pakdaman N., Ghaderian S. M., Ghasemi R., Asemaneh T. 2013. Effects of calcium/magnesium quotients and nickel in the growth medium on growth and Nickel accumulation in *Pistacia atlantica*. *Journal of Plant Nutrition* 36: 1708–1718.
- Pavlova D., Karadjova I. 2013. Toxic Element Profiles in Selected Medicinal Plants Growing on Serpentes in Bulgaria. *Biol Trace Elem Res* 156: 288–297.

- Pavlova D. 2009. Morphological Variation in *Teucrium chamaedrys* in serpentine and non-serpentine populations. *Northeastern Naturalist* 16(Sp. 5): 39–55.
- Pedashenko H., Apostolova I., Boch S., Ganeva A., Janišová M., Sopotlieva D., Todorova S., Ünal A., Vassilev K., Velez N., Dengler J. 2013. Dry grasslands of NW Bulgarian mountains: first insights into diversity, ecology and syntaxonomy. *Tuexenia* 33: 309–346.
- Pędziwiatr A., Kierczak J., Waroszewski J., Ratié G., Quantin C., Ponzevera E. 2018. Rock-type control of Ni, Cr, and Co phytoavailability in ultramafic soils. *Plant Soil* 423: 339–362.
- Proctor J. 1971. The plant ecology of serpentine. II. Plant response to serpentine soils. *Journal of Ecology* 59(2): 397–410.
- Proctor J., Woodell S.R.J. 1971. The plant ecology of serpentine. I. Serpentine vegetation of England and Scotland. *Journal of Ecology* 59(2): 375–395.
- Proctor J., Woodell S.R.J. 1975. The ecology of serpentine soils. *Advances in Ecological Research* 9: 255–366.
- Proctor J., Baker A.J.M., van Balgooy M.M.J., Bruijnzeel L.A., Jones S.H., Madulid D.A. 2000. Mount Bloomfield, Palawan, Philippines: forests on greywacke and serpentinized peridotite. *Edinb J Bot* 57: 121–139.
- Proctor J., McGowan I.D. 1976. Influence of magnesium on nickel toxicity. *Nature* 260: 134.
- Proctor J., Nagy L. 1993. Ultramafic rocks and their vegetation: an overview. In: Baker A.J.M. (ed.) *The vegetation of ultramafic (serpentine) soils. Proceedings of the First International Conference on Serpentine Ecology*. Intercept Ltd. Andover, Hampshire, 469–494.
- Quevauviller P., Lachica M., Barahona E., Rauret G., Ure A., Gomez A., Muntau H. 1996. Interlaboratory comparison of EDTA and DTPA procedures prior to certification of extractable trace elements in calcareous soil. *The Science of the Total Environment* 178: 127–132.
- Reeves R.D., Baker A.J.M. 1984. Studies on metal uptake by plants from serpentine and non-serpentine populations of *Thlaspi goesingense* Hálácsy (*Cruciferae*). *New Phytologist* 98: 191–204.

- Reeves R.D., Baker A.J.M. 2000. Metal-accumulating plants. W: Raskin I., Ensley B.D. (eds) *Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean up the environment*. John Wiley & Sons, Inc, New York, 193–229.
- Reeves R.D., Baker A.J.M., Borhidi A., Berazain R. 1999. Nickel hyperaccumulation in the serpentine flora of Cuba. *Ann Bot* 83: 29–38.
- Reeves R.D., Kruckeberg A.R. 2018. Re-examination of the elemental composition of some *Caryophyllaceae* on North American ultramafic soils. *Ecol Res* 33: 715–722.
- Reeves R.D., van der Ent A., Baker A.J.M. 2018. Global Distribution and Ecology of Hyperaccumulator Plants. W: van der Ent A., Echevarria G., Baker A.J.M., Morel J.L. (eds) *Agromining: farming for metals: extracting unconventional resources using plants*. Springer, Cham, 75–92.
- Remon E., Bouchardon J.-L., Faure O. 2007. Multi-tolerance to heavy metals in *Plantago arenaria* Waldst. & Kit.: Adaptive versus constitutive characters. *Chemosphere* 69: 41–47.
- Roberts B.A., Proctor J. 1992. Introduction. W: Roberts B.A. i Proctor J. (eds) *The Ecology of Areas with Serpentinized Rocks. A world view*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 1–5. *The Ecology of Areas with Serpentinized Rocks: A World View - Google Książki* [13.03.2021].
- Roccoliello E., Serrano H.C., Mariotti M.G., Branquinho C. 2015. Nickel phytoremediation potential of the Mediterranean *Alyssoides utriculata* (L.) Medik. *Chemosphere* 119: 1372–1378.
- Roleček J., Čornej I.I., Tokarjuk A.I. 2014. Understanding the extreme species richness of semi-dry grasslands in east-central Europe: a comparative approach. *Preslia* 86: 13–34.
- Rutkowski L. 2008. *Klucz do oznaczania roślin naczyniowych Polski niżowej*. Wyd. PWN, Warszawa, 816 pp.
- Sachanbiński M., Awdankiewicz M., Górecka-Nowak A., Nowak G. J., Lorenc S., Koszela S., Kryza G., Kryza R., Piestrzyński A., Protas A., Ratajczak T., Solecki A. 2015. Surowce mineralne. W: Żelaźniewicz A. (red.) *Przyroda Dolnego Śląska*. Wyd. II. Polska Akademia Nauk, Oddział we Wrocławiu, Wrocław, 165–221.
- Salehi-Eskandari B., Ghaderian S.M., Schat H. 2018. Differential interactive effects of the Ca/Mg quotient and PEG-simulated drought in *Alyssum inflatum* and *Fortuynia garcinii*. *Plant Soil* 428: 213–222.

- Salihaj M., Bani A. 2018. Chemical Properties of Serpentine Soils from Kosovo. *Albanian j. agric. sci.* 17(1): 78–83.
- Salihaj M., Bani A., Shahu E., Benizri E., Echevarria G. 2018. Metal accumulation by the ultramafic flora of Kosovo. *Ecol Res* 33: 687–703.
- Samecka-Cymerman A., Garbiec K., Kolon K., Kempers J. 2009. Factor analysis of the elemental composition of *Pteridium aquilinum* from serpentine and granite soils as a tool in the classification of relations between this composition and the type of parent rock in the Ślęza Massif in Lower Silesia, Poland. *Environ Geol* 58: 509–514.
- Sasse F. 1979a. Untersuchungen an Serpentinstandorten in Frankreich, Italien, Österreich und der Bundesrepublik Deutschland. I. Bodenanalysen. *Flora* 168: 379–395.
- Sasse F. 1979b. Untersuchungen an Serpentinstandorten in Frankreich, Italien, Österreich und der Bundesrepublik Deutschland. II. Pflanzenanalysen. *Flora* 168: 578–594.
- Sawicki L. 1979. Surowce węglanowe: Wapienie, dolomity oraz marmury. W: Dziedzic K., Kozłowski S., Majerowicz A., Sawicki L. (red.) Surowce mineralne Dolnego Śląska. Zakład Narodowy im. Ossolińskich, Wrocław, 298–326.
- Seregin I.V., Kozhevnikova A.D. 2006. Physiological role of nickel and its toxic effects on higher plants. *Russian Journal of Plant Physiology* 53(2): 257–277.
- Shewry P.R., Peterson P.J. 1976. Distribution of chromium and nickel in plants and soil from serpentine and other sites. *Journal of Ecology* 64: 195–212.
- Sobik M. 2005. Klimat. W: Fabiszewski J. (red.) Przyroda Dolnego Śląska. Polska Akademia Nauk, Oddział we Wrocławiu, Wrocław, 39–57.
- Staffa M., Mazurski K. R., Czerwiński J., Pisarski G. 2008a. Słownik geografii turystycznej Sudetów. Tom 21 (A-M): Wzgórza Niemczańsko-Strzelińskie, Przedgórze Paczkowskie. Wydawnictwo I-BiS, Wrocław, 11–38.
- Staffa M., Mazurski K. R., Czerwiński J., Pisarski G. 2008b. Słownik geografii turystycznej Sudetów. Tom 21 (N-Ż): Wzgórza Niemczańsko-Strzelińskie, Przedgórze Paczkowskie. Wydawnictwo I-BiS, Wrocław, 395–398.
- Staffa M., Mazurski K.R., Czerwiński J., Pisarski G. 2005. Słownik Geografii Turystycznej Sudetów. Tom 20: Masyw Ślęży, Równina Świdnicka, Kotlina Dzierżoniowska. Wydawnictwo I-BiS, Wrocław 13–33.
- Stanisavljević N., Savić J., Jovanović Ž., Miljuš-Đukić J., Senčanski J., Simonović M., Radović S., Vinterhalter D., Vinterhalter B. 2018. Fingerprinting of the antioxidant

- status in *Alyssum markgrafii* shoots during nickel hyperaccumulation *in vitro*. *Acta Physiologiae Plantarum* 40: 101.
- Stanisz A. 2006. Przystępny kurs statystyki. Tom 1-3. StatSoft, Kraków, 1900 pp.
- StatSoft, Inc. 2014. STATISTICA (data analysis software system), version 12.5. <http://www.statsoft.com>.
- Stefaniak Z., Michałowski M., Midura T. 2008. Klimat, Geologia. W: Opracowanie ekofizjograficzne województwa opolskiego. Urząd Marszałkowski województwa opolskiego, Opole, 9–13; 56–61.
- Stefanowicz A.M., Stanek M., Woch M.W., Kapusta P. 2016. The accumulation of elements in plants growing spontaneously on small heaps left by the historical Zn-Pb ore mining. *Environ Sci Pollut Res* 23: 6524–6534.
- Stupnicka E., Stempień-Sałek M. 2016. Kra sowiogórska i jej otoczenie. W: Stupnicka E., Stempień-Sałek M. Geologia regionalna Polski. Wyd. 4 zm. Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa, 77–81.
- Sudnik-Wójcikowska B., Cwener A. 2012. Rośliny kserotermiczne. MULTICO Oficyna Wydawnicza, Warszawa, 316 pp.
- Sujkowska-Rybkowska M., Kasowska D., Gediga K., Banasiewicz J., Stępkowski T. 2020. *Lotus corniculatus*-rhizobia symbiosis under Ni, Co and Cr stress on ultramafic soil. *Plant Soil* 451: 459–484.
- Świerkosz K. 2012. Masyw Ślęży. W: Świerkosz K., Liberacka H., Łysiak M., Zając K. (red.) Obszary Natura 2000 na Dolnym Śląsku. Regionalna Dyrekcja Ochrony Środowisk we Wrocławiu, Wrocław, 190–193.
- Świerkosz K., Szczeńniak E. 2012. Specjalne Obszary Ochrony Siedlisk: Góry i Pogórze Kaczawskie. W: Świerkosz K., Liberacka H., Łysiak M., Zając K. (red.) Obszary Natura 2000 na Dolnym Śląsku. Regionalna Dyrekcja Ochrony Środowiska we Wrocławiu, Wrocław, 110–113.
- Symeonidis L., McNeilly T., Bradshaw A.D. 1985. Differential tolerance of three cultivars of *Agrostis capillaris* L. to cadmium, copper, lead, nickel and zinc. *New Phytol* 101: 309–315.
- Szafer W., Kulczyński S., Pawłowski B. 1986. Rośliny polskie. Cz. II. Wyd. V. Wyd. PWN, Warszawa, 465–1019.
- Szafer W., Kulczyński S., Pawłowski B. 1988. Rośliny polskie. Cz. I. Wyd. VI. Wyd. PWN, Warszawa, 1–465.

- Szczyński E. 2003. Rzadkie i zagrożone gatunki ciepłolubnych muraw na Dolnym Śląsku. W: Kącki Z. (red) Zagrożone gatunki flory naczyniowej Dolnego Śląska. Instytut Biologii Roślin, Uniwersytet Wrocławski. Polskie Towarzystwo Przyjaciół Przyrody „Pro Natura”, Wrocław, 85–107.
- Szczyński E. 2004. Gatunki ciepłolubne we florze Śląska Opolskiego: stan, zagrożenia, ochrona. W: Nowak A., Spałka K. (red.) Ochrona szaty roślinnej Śląska Opolskiego. Wyd. Uniwersytetu Opolskiego, Opole, 209–220.
- Szczyński E. i Kącki Z. 2015. Podział geobotaniczny Dolnego Śląska. W: Żelaźniewicz A. (red.) Przyroda Dolnego Śląska. Wyd. II. Polska Akademia Nauk, Oddział we Wrocławiu, Wrocław, 243–255.
- Szymańska M. 2012. Odżywianie mineralne roślin. W: Kopcewicz J., Lewak S., Gabryś H. (red) Fizjologia roślin. Wyd. 3 zm. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 234–273.
- ter Braak C. J. F., Šmilauer P. 2012. Canoco reference manual and user's guide: software for ordination (version 5.0). Microcomputer Power Ithaca, NY, USA, 496 pp.
- Tilstone G.H., Macnair M.R. 1997. Nickel tolerance and copper – nickel co-tolerance in *Mimulus guttatus* from copper mine and serpentine habitats. *Plant and Soil* 191: 173–180.
- Tomović G., Buzurović U., Đurović S., Vicić D., Mihailović N., Jakovljević K. 2018. Strategies of heavy metal uptake by three *Armeria* species growing on different geological substrates in Serbia. *Environ Sci Pollut Res* 25: 507–522.
- Turner T.L., Bourne E.C., Von Wettberg E.J., Hu T.T., Nuzhdin S.V. 2010. Population resequencing reveals local adaptation of *Arabidopsis lyrata* to serpentine soils. *Nature Genetics* 42(3): 260–264.
- van der Ent A., Baker A.J.M., Reeves R.D., Pollard A.J., Schat H. 2013. Hyperaccumulators of metal and metalloids: Facts and fiction. *Plant Soil* 362: 319–334.
- Veatch-Blohm M.E., Roche B.M., Campbell M.J. 2013. Evidence for cross-tolerance to nutrient deficiency in three disjunct populations of *Arabidopsis lyrata* ssp. *lyrata* in response to substrate calcium to magnesium ratio. *PLoS ONE* 8(5): e63117. doi:10.1371/journal.pone.0063117.
- Veatch-Blohm M.E., Roche B.M., Dahl E.E. 2017. Serpentine populations of *Arabidopsis lyrata* ssp. *lyrata* show evidence for local adaptation in response to nickel exposure

- at germination and during juvenile growth. *Environmental and Experimental Botany* 138: 1–9.
- Vergnano Gambi O., Gabbrielli R., Pancaro L. 1982. Nickel, chromium and cobalt in plants from Italian serpentine areas. *Acta Oecologica Oecol. Plant.* 3(17): 291–306.
- Vicić D.D., Stoiljković M.M., Bojat N.Č., Sabovljević M.S., Stevanović B.M. 2014. Physiological tolerance mechanisms of serpentine tolerant plants from Serbia. *Rev. Écol. (Terre Vie)* 69: 185–195.
- Visioli G., Gulli M., Marmioli N. 2014. *Noccaea caerulescens* populations adapted to grow in metalliferous and non-metalliferous soils: Ni tolerance, accumulation and expression analysis of genes involved in metal homeostasis. *Environmental and Experimental Botany* 105: 10–17.
- Walker R.B. 1954. The ecology of serpentine soils. II. Factors affecting plant growth on serpentine soils. *Ecology* 35: 259–266.
- Walker R.B., Walker H.M., Ashworth P.R. 1955. Calcium-magnesium nutrition with special reference to serpentine soils. *Plant Physiology* 30(3): 214–221.
- Weber J. 1980. Geneza i właściwości gleb wytworzonych z serpentynitów Dolnego Śląska. Cz. I. Charakterystyka skały macierzystej. *Roczniki Gleboznawcze* 31(1): 143–161.
- Weber J. 1981. Geneza i właściwości gleb wytworzonych z serpentynitów Dolnego Śląska. Cz. III. Właściwości fizykochemiczne. *Roczniki Gleboznawcze* 32(2): 145–159.
- Westerbergh A. 1994. Serpentine and non-serpentine *Silene dioica* plants do not differ in nickel tolerance. *Plant and Soil* 167: 297–303.
- Whittaker R.H. 1954. The ecology of serpentine soils. IV. The vegetational response to serpentine soils. *Ecology* 35(2): 275–288.
- Woch M.W., Kapusta P., Stefanowicz A.M. 2016. Variation in dry grassland communities along a heavy metals gradient. *Ecotoxicology* 25: 80–90.
- Woś A. 1999. *Klimat Polski*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 301 pp.
- Zarzycki K., Trzcńska-Tacik H., Różański W., Szelaż Z., Wołek J., Korzeniak U. 2002. Ecological indicator values of vascular plants of Poland. W. Szafer Inst. of Botany, Polish Acad. of Sciences, Kraków, 183 pp.
- Żelaźniewicz A. 2015. Przeszłość geologiczna. W: Żelaźniewicz A. (red) *Przyroda Dolnego Śląska*. Wyd. II. Polska Akademia Nauk, Oddział we Wrocławiu, Wrocław, 39–99.

- Zlatić N.M., Stanković M.S., Simić Z.S. 2017. Secondary metabolites and metal content dynamics in *Teucrium montanum* L. and *Teucrium chamaedrys* L. from habitats with serpentine and calcareous substrate. *Environ Monit Assess* 189: 110.
- Zoldoš V., Biruš I., Muratović E., Šatović Z., Vojta A., Robin O., Pustahija F., Bogunić F., Vičić Bočkor V., Siljak-Yakovlev S. 2018. Epigenetic Differentiation of Natural Populations of *Lilium bosniacum* associated with contrasting habitat conditions. *Genome Biol. Evol.* 10(1): 291–303.
- Żołnierz L. 1989. Rola metali ciężkich w odrębności roślin i siedlisk serpentynitowych Dolnego Śląska. Maszynopis pracy doktorskiej. Akademia Rolnicza we Wrocławiu.
- Żołnierz L. 1993. Nikiel w roślinach gleb serpentynitowych Dolnego Śląska. Chrom, nikiel i glin w środowisku – problemy ekologiczne i metodyczne. *Zesz. Nauk. PAN, Człowiek i Środowisko* 5: 159–166.
- Żołnierz L. 2004. Pobieranie niklu, magnezu i wapnia przez gatunki roślin uprawnych rosnących na glebach serpentynitowych o różnych właściwościach chemicznych. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Rolnictwo* 85, 487: 229–240.
- Żołnierz L. 2007. Zbiorowiska trawiaste występujące na dolnośląskich serpentynitach – wybrane aspekty ekologii. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, 231 pp.
- Żołnierz L. 2011a. Szata roślinna Masywu Ślęży – historia poznania, stan zachowania, problemy ochrony. W: Kunicki W. i Smereka J. (red.) *Ślęzańskie Świąty*. Oficyna Wydawnicza ATUT – Wrocławskie Wydawnictwo Oświatowe, Wrocław, 29–40.
- Żołnierz L. 2011b. The role of grasses in the ecology of dry grasslands occurring on Polish serpentines. W: Frey L. (red.) *Advances in grass biosystematics*. Wydawnictwo Instytutu Botanicznego im. W. Szafera, Polska Akademia Nauk, Kraków, 87–97.



## 9. Spis tabel oraz rysunków

### 9.1 Spis tabel

Tabela 1. Zestawienie badanych obiektów. Stanowiska z granitów, serpentynitów i wapieni oznaczono literami G, S i W .....	13
Tabela 2. Zawartość makroskładników w pożywce ( $\text{mmol dm}^{-3}$ ).....	29
Tabela 3. Właściwości fizyko-chemiczne gleb serpentynitowej (S) oraz granitowej (G) wykorzystanych w doświadczeniu wazonowym. Podano formy wymienne pierwiastków (ekstrakcja z użyciem 1M HCl).....	30
Tabela 4. Właściwości siedlisk badanych obiektów z różnych podłoży geologicznych (G – granity, S – serpentynity, W – wapienie). Podano średnie $\pm$ SE. Średnie nieróżniące się istotnie przy $p \leq 0.05$ oznaczono tymi samymi literami: małe dotyczą różnic pomiędzy wszystkimi jednostkami fizjograficznymi, duże pomiędzy podłożami skalnymi .....	38
Tabela 5. Koncentracje całkowite pierwiastków w glebach powierzchni z różnych podłoży geologicznych (G – granity, S – serpentynity, W – wapienie). Podano średnie $\pm$ SE. Średnie nieróżniące się istotnie przy $p \leq 0.05$ oznaczono tymi samymi literami: małe dotyczą różnic pomiędzy wszystkimi jednostkami fizjograficznymi, duże pomiędzy podłożami skalnymi .....	41
Tabela 6. Koncentracje wymienne pierwiastków w glebach powierzchni z różnych podłoży geologicznych (G – granity, S – serpentynity, W – wapienie). Podano średnie $\pm$ SE. Średnie nieróżniące się istotnie przy $p \leq 0.05$ oznaczono tymi samymi literami: małe dotyczą różnic pomiędzy wszystkimi jednostkami fizjograficznymi, duże pomiędzy podłożami skalnymi .....	45
Tabela 7. Zestawienie wartości własnych wraz z procentowym udziałem w ogólnej wariancji składowych głównych oraz ładunków czynnikowych zmiennych dla PCA uwzględniającej parametry topograficzno-fizyczne powierzchni badawczych.....	47
Tabela 8. Zestawienie wartości własnych wraz z procentowym udziałem w ogólnej wariancji składowych głównych oraz ładunków czynnikowych zmiennych dla PCA uwzględniającej właściwości chemiczne gleb wszystkich powierzchni badawczych.....	49
Tabela 9. Zestawienie wartości własnych wraz z procentowym udziałem w ogólnej wariancji składowych głównych oraz ładunków czynnikowych zmiennych dla PCA uwzględniającej zawartości całkowite pierwiastków w glebach .....	51

Tabela 10. Właściwości roślinności badanych obiektów z różnych podłoży geologicznych (G – granity, S – serpentynity, W – wapienie). Podano średnie $\pm$ SE. Średnie nieróżniące się istotnie przy $p \leq 0.05$ oznaczono tymi samymi literami: małe dotyczą różnic pomiędzy wszystkimi jednostkami fizjograficznymi, duże pomiędzy podłożami skalnymi.....	55
Tabela 11. Podsumowanie wyników nietendencyjnej analizy zgodności (DCA) .....	56
Tabela 12. Podsumowanie wyników kanonicznej analizy zgodności (CCA) dla zmiennych siedliskowych badanych powierzchni .....	57
Tabela 13. Wyniki kanonicznej analizy zgodności (CCA) dotyczącej istotności zmiennych w odniesieniu do kompozycji gatunkowej muraw – efekty marginalne oraz efekty warunkowe. Wartości dla zmiennych o istotnym wpływie ( $p \leq 0.05$ ) zapisano pogrubioną czcionką .....	57
Tabela 14. Podsumowanie kanonicznej analizy zgodności (CCA) z wykorzystaniem metody GAM dla reakcji gatunków w stosunku do wybranych zmiennych siedliskowych i pierwszych dwóch osi CCA; pogrubiono wartości istotne ( $p \leq 0.05$ ). Rozwinięcie skrótów nazw gatunków zestawiono w załączniku 10.1 .....	67
Tabela 15. Skład pierwiastkowy nadziemnych części roślin występujących na murawach z różnych podłoży geologicznych (G – granity, S – serpentynity, W – wapienie). Podano średnie $\pm$ SE. Średnie nieróżniące się istotnie przy $p \leq 0.05$ oznaczono tymi samymi literami, osobno dla każdego gatunku.....	70
Tabela 16. Zestawienie wartości własnych z procentowym udziałem w ogólnej wariancji składowych głównych oraz ładunków czynnikowych zmiennych dla składu chemicznego <i>E. cyparissias</i> .....	74
Tabela 17. Zestawienie wartości własnych wraz z procentowym udziałem w ogólnej wariancji składowych głównych oraz ładunków czynnikowych zmiennych dla składu chemicznego <i>Galium verum</i> .....	76
Tabela 18. Zestawienie wartości własnych wraz z procentowym udziałem w ogólnej wariancji składowych głównych oraz ładunków czynnikowych zmiennych dla składu chemicznego <i>Hypericum perforatum</i> .....	78
Tabela 19. Zestawienie wartości własnych wraz z procentowym udziałem w ogólnej wariancji składowych głównych oraz ładunków czynnikowych zmiennych dla składu chemicznego <i>Scabiosa ochroleuca</i> .....	80

Tabela 20. Zestawienie wartości własnych wraz z procentowym udziałem w ogólnej wariancji składowych głównych oraz ładunków czynnikowych zmiennych dla składu chemicznego <i>Thymus pulegioides</i> .....	82
Tabela 21. Skład pierwiastkowy pędów <i>Euphorbia cyparissias</i> pochodzącego z granitów (Chw) oraz serpentynitów (N1, Prz) uprawianego w kulturach wodnych przy różnych wartościach stosunku Mg/Ca oraz stężeniach Ni. Podano średnie $\pm$ SE; średnie oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie. Istotności różnic badano testem Tukeya (Ca, Mg/Ca, Fe) po jednokierunkowej analizie wariancji oraz testem Kruskala-Wallisa (Mg, K, Ni, Mn, Cu, Zn); n.o. – nie oznaczano .....	89
Tabela 22. Skład pierwiastkowy <i>Galium verum</i> właściwej pochodzącej z granitów (Strz) oraz serpentynitów (N1, N2) uprawianej w kulturach wodnych przy różnych wartościach stosunku Mg/Ca oraz stężeniach niklu. Podano średnie $\pm$ SE; średnie oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie; n.o. – nie oznaczano .....	94

## 9.2 Spis rysunków

Rys. 1. Rozmieszczenie badanych obiektów .....	12
Rys. 2. Wykres analizy składowych głównych (PCA) dla wybranych czynników topograficzno-fizycznych powierzchni badawczych .....	48
Rys. 3. Projekcja wyników analizy składowych głównych (PCA) dla wybranych czynników topograficzno-fizycznych. Poszczególne litery przedstawiają uporządkowanie powierzchni badawczych z różnych podłoży geologicznych (G – granit, S – serpentynit, W – wapień) w przestrzeni dwóch pierwszych osi kanonicznych...	48
Rys. 4. Wykres analizy PCA dla właściwości chemicznych gleb wszystkich powierzchni badawczych. Wymienione pierwiastki dotyczą zawartości wymiennych za wyjątkiem azotu .....	50
Rys. 5. Projekcja wyników analizy PCA dla właściwości chemicznych gleb. Poszczególne litery przedstawiają uporządkowanie powierzchni badawczych z różnych podłoży geologicznych (G – granit, S – serpentynit, W – wapień) w przestrzeni dwóch pierwszych osi kanonicznych.....	51
Rys. 6. Wykres analizy PCA dla zawartości całkowitych pierwiastków w glebach badanych powierzchni .....	52

Rys. 7. Projekcja wyników analizy PCA dla zawartości całkowitych pierwiastków w glebach. Poszczególne litery przedstawiają uporządkowanie powierzchni badawczych z różnych podłoży geologicznych (G – granit, S – serpentynit, W – wapień) w przestrzeni dwóch pierwszych osi kanonicznych .....	52
Rys. 8. Diagram kanonicznej analizy zgodności (CCA) dla powierzchni badawczych z różnych podłoży (S – serpentynitów, G – granitów i W – wapieni) i zmiennych siedliskowych w przestrzeni dwóch pierwszych osi CCA. Przedstawiono zmienne istotnie wpływające na kompozycję gatunkową ( $p \leq 0.05$ ); zielonym kolorem zaznaczono zmienne istotne w analizie efektów warunkowych (conditional effects). Koncentracje wymiennych pierwiastków ekstrahowano octanem amonu (Ca, Mg, K) i 1M HCl (pozostałe metale).....	59
Rys. 9. Diagram kanonicznej analizy zgodności (CCA) gatunków występujących na ciepłolubnych murawach w przestrzeni dwóch pierwszych osi kanonicznych. Skrótów nazw gatunków zamieszczono w załączniku 10.1 .....	61
Rys. 10. Współwystępowanie gatunków na powierzchniach badawczych w obrębie siedlisk na granitach (G), serpentynitach (S) i wapieniach (W). Skrótów nazw gatunków zamieszczono w załączniku 10.1 .....	61
Rys. 11. Diagram kanonicznej analizy zgodności (CCA) z izoliniami odpowiadającymi wartościom współczynnika Shannona-Wienera ( $H'$ ) dla roślinności powierzchni badawczych w przestrzeni dwóch pierwszych osi CCA .....	63
Rys. 12. Krzywe reakcji gatunków względem koncentracji wymiennego magnezu oraz wapnia w glebach.....	64
Rys. 13. Krzywe reakcji gatunków względem gradientu stosunku koncentracji wymiennego magnezu do wapnia w glebach oraz koncentracji wymiennego niklu.....	65
Rys. 14. Krzywe reakcji gatunków względem pierwszej i drugiej osi CCA .....	66
Rys. 15. Współczynniki koncentracji dla: A) magnezu, B) wapnia, C) $Ni_{HCl}$ , D) chromu i E) kobaltu w pędach roślin z podłoży serpentynitowych; skrótów nazw gatunków rozwinięto w załączniku 10.1 .....	73
Rys. 16. Wykres analizy PCA dla zawartości pierwiastków w pędach <i>Euphorbia cyparissias</i> z badanych muraw .....	75
Rys. 17. Wykres analizy PCA dla składu pierwiastkowego pędów <i>Euphorbia cyparissias</i> z powierzchni badawczych na różnych podłożach (G – granit, S – serpentynit, W – wapień).....	75

- Rys. 18. Wykres analizy PCA dla zawartości pierwiastków w pędach *Galium verum* z badanych muraw..... 77
- Rys. 19. Wykres analizy PCA dla składu pierwiastkowego pędów *Galium verum* z badanych powierzchni na różnych podłożach (G – granit, S – serpentynit, W – wapień)..... 77
- Rys. 20. Wykres analizy PCA dla zawartości pierwiastków w pędach *Hypericum perforatum* z badanych muraw..... 79
- Rys. 21. Wykres analizy PCA dla składu pierwiastkowego pędów *Hypericum perforatum* z badanych powierzchni na różnych podłożach (G – granit, S – serpentynit, W – wapień)..... 79
- Rys. 22. Wykres analizy PCA dla zawartości pierwiastków w pędach *Scabiosa ochroleuca* z badanych muraw..... 81
- Rys. 23. Wykres analizy PCA dla składu pierwiastkowego pędów *Scabiosa ochroleuca* z badanych powierzchni na różnych podłożach (G – granit, S – serpentynit, W – wapień)..... 81
- Rys. 24. Wykres analizy PCA dla zawartości pierwiastków w pędach *Thymus pulegioides* z badanych muraw..... 83
- Rys. 25. Wykres analizy PCA dla składu pierwiastkowego pędów *Thymus pulegioides* z badanych powierzchni na różnych podłożach (G – granit, S – serpentynit, W – wapień)..... 83
- Rys. 26. Przyrost głównego korzenia (a) oraz pędu (b) *E. cyparissias* po ekspozycji na różne koncentracje Ni (0, 5, 10 mg Ni dm<sup>-3</sup>) przy zróżnicowanym stosunku Mg/Ca (1:1 i 8:1) w pożywce w populacjach z granitów (Chw – zaznaczono jasnoszarym kolorem) i serpentynitów (N1, Prz). Podano średnie ±SE. Warianty doświadczenia oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie. Dla przyrostu korzeni zastosowano test Kruskala Wallisa (H=76.5; p≤0.05) ), dla przyrostu pędów jednokierunkową analizę wariancji z testem HSD Tukeya (F=6.17, p <0.0001) ..... 86
- Rys. 27. Indeks tolerancji (IT) liczony jako stosunek średniej długości korzenia głównego do długości korzeni z wariantu kontrolnego (Mg/Ca 1:1, bez dodatku Ni) po ekspozycji na 5 i 10 mg Ni dm<sup>-3</sup> przy różnych wartościach stosunku Mg/Ca (1:1 i 8:1) w pożywce w populacjach *Euphorbia cyparissias* z granitów (Chw – zaznaczono jasnoszarym kolorem) i serpentynitów (N1, Prz). Podano średnie ±SE. Warianty doświadczenia oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie przy (Test HSD Tukeya: F=62.2, p <0.0001)..... 87

- Rys. 28. Przyrost głównego korzenia (a) oraz pędu (b) *G. verum* po ekspozycji na różne koncentracje Ni (0, 5, 10 mg dm<sup>-3</sup>) przy zróżnicowanym stosunku Mg/Ca (1:1 i 8:1) w pożywce w populacjach z granitów (Strz – zaznaczono jasnoszarym kolorem) i serpentynitów (N1, N2). Podano średnie ±SE. Warianty doświadczenia oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie (Test Kruskala Wallisa dla korzeni: H=60.2; p≤0.01, dla pędów: H=57.4; p≤0.01)..... 91
- Rys. 29. Indeks tolerancji (IT) liczony jako stosunek średniej długości korzenia głównego do długości korzeni z wariantu kontrolnego (Mg/Ca 1:1, bez dodatku Ni) po ekspozycji na 5 i 10 mg Ni dm<sup>-3</sup> przy różnych wartościach stosunku Mg/Ca (1:1 i 8:1) w pożywce w populacjach *Galium verum* z granitów (Strz – zaznaczono jasnoszarym kolorem) i serpentynitów (N1, N2). Podano średnie ±SE. Warianty doświadczenia oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie (test Kruskala-Wallisa H=54.0; p≤0.01)..... 92
- Rys. 30. Przyrost długości pędów (A), sucha masa pędów (B), sucha masa korzeni (C), oraz zawartości pierwiastków (D-L) w populacjach *E. cyparissias* z granitów (Chw) i serpentynitów (Prz, N1) uprawianych na glebach granitowej (G) oraz serpentynitowej (S). Słupki oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie, małe litery a i b dotyczą różnic między populacjami rosnącymi na glebie granitowej, wielkie litery A i B – na glebie serpentynitowej, litery x i y dotyczą każdej populacji osobno, porównywanej pomiędzy obiema glebami.....98
- Rys. 31. Przyrost długości pędów (A), sucha masa pędów (B), sucha masa korzeni (C), oraz zawartości pierwiastków (D-L) w populacjach *G. verum* z granitów (Strz) i serpentynitów (N1, N2) uprawianych w glebach granitowej (G) oraz serpentynitowej (S). Słupki oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie, małe litery a i b dotyczą różnic między populacjami rosnącymi na glebie granitowej, wielkie litery A i B – na glebie serpentynitowej, litery x i y dotyczą każdej populacji osobno, porównywanej pomiędzy obiema glebami.....102

## 10. Załączniki

### 10.1 Zestawienie skrótów nazw gatunków roślin użytych w pracy

Lp.	Gatunek	Skrót	Lp.	Gatunek	Skrót
1	<i>Achillea millefolium</i> L.	Achi.mil	45	<i>Lotus corniculatus</i> L.	Lotu.cor
2	<i>Agrimonia eupatoria</i> L.	Agri.eup	46	<i>Luzula campestris</i> (L.) DC.	Luzu.cam
3	<i>Agrostis capillaris</i> L.	Agro.cap	47	<i>Melilotus alba</i> Medik.	Meli.alb
4	<i>Agrostis vinealis</i> Schreb.	Agro.vin	48	<i>Origanum vulgare</i> L.	Orig.vul
5	<i>Anthoxanthum odoratum</i> L.	Anth.odo	49	<i>Phleum phleoides</i> (L.) H. Karst.	Phle.phl
6	<i>Anthriscus sylvestris</i> (L.) Hoffm.	Anth.syl	50	<i>Picris hieracioides</i> L.	Picr.hie
7	<i>Anthyllis vulneraria</i> L.	Anth.vul	51	<i>Pimpinella saxifraga</i> L.	Pimp.sax
8	<i>Arenaria serpyllifolia</i> L.	Aren.ser	52	<i>Plantago lanceolata</i> L.	Plan.lan
9	<i>Arrhenatherum elatius</i> (L.) P. Beauv. ex J. Presl & C. Presl	Arrh.ela	53	<i>Plantago media</i> L.	Plan.med
10	<i>Artemisia scoparia</i> Waldst. & Kit.	Arte.sco	54	<i>Poa compressa</i> L.	Poa.com
11	<i>Asplenium rutamuraria</i> L.	Aspl.rut	55	<i>Poa pratensis</i> L.	Poa.prat
12	<i>Avenula pratensis</i> (L.) Dumort.	Aven.pra	56	<i>Polygala amara</i> L.	Poly.ama
13	<i>Brachypodium sylvaticum</i> (Huds.) P. Beauv.	Brac.syl	57	<i>Potentilla arenaria</i> Borkh.	Pote.are
14	<i>Briza media</i> L.	Briz.med	58	<i>Potentilla argentea</i> L.	Pote.arg
15	<i>Calamagrostis epigejos</i> (L.) Roth	Cala.epi	59	<i>Potentilla heptaphylla</i> L.	Pote.hep
16	<i>Campanula patula</i> L.	Camp.pat	60	<i>Potentilla neumanniana</i> Rehb.	Pote.neu
17	<i>Carex caryophylla</i> Latourr.	Care.car	61	<i>Prunella grandiflora</i> (L.) Scholler	Prun.gra
18	<i>Carex flacca</i> Schreb.	Care fla	62	<i>Quercus robur</i> L. juv.	Quer.rob
19	<i>Carlina vulgaris</i> L.	Carl.vul	63	<i>Ranunculus acris</i> L.	Ranu.acr
20	<i>Centaurea stoebe</i> L.	Cent.sto	64	<i>Rosa</i> sp.	Rosa.sp
21	<i>Cichorium intybus</i> L.	Cich.int	65	<i>Rubus saxatilis</i> L.	Rubu.sax
22	<i>Clinopodium vulgare</i> L.	Clin.vul	66	<i>Sanguisorba officinalis</i> L.	Sang.off
23	<i>Coronilla varia</i> L.	Coro.var	67	<i>Scabiosa ochroleuca</i> L.	Scab.och
24	<i>Crataegus monogyna</i> Jacq. juv.	Crat.mon	68	<i>Sedum maximum</i> (L.) Hoffm.	Sedu.max
25	<i>Danthonia decumbens</i> DC.	Dant.dec	69	<i>Senecio jacobaea</i> L.	Sene.jac
26	<i>Daucus carota</i> L.	Dauc.car	70	<i>Seseli annuum</i> L.	Sese.ann
27	<i>Deschampsia flexuosa</i> (L.) Trin.	Desc.fle	71	<i>Silene vulgaris</i> (Moench) Garcke	Sile.vul
28	<i>Dianthus cartusianorum</i> L.	Dian.car	72	<i>Teucrium botrys</i> L.	Teuc.bot
29	<i>Echium vulgare</i> L.	Echi.vul	73	<i>Thymus pulegioides</i> L.	Thym.pul
30	<i>Erigeron acris</i> L.	Erig.acr	74	<i>Trifolium arvense</i> L.	Trif.arv
31	<i>Euphorbia cyparissias</i> L.	Euph.cyp	75	<i>Trifolium campestre</i> Schreb.	Trif.cam
32	<i>Euphrasia stricta</i> D. Wolff ex J. F. Lehm.	Euph.str	76	<i>Trifolium hybridum</i> L.	Trif.hyb
33	<i>Festuca ovina</i> agg.	Fest.ovi	77	<i>Trifolium montanum</i> L.	Trif.mon
34	<i>Festuca rubra</i> L. s. s.	Fest.rub	78	<i>Trifolium pratense</i> L.	Trif.pra
35	<i>Festuca valesiaca</i> agg.	Fest.val	79	<i>Veronica spicata</i> L.	Vero.spi

Lp.	Gatunek	Skrót	Lp.	Gatunek	Skrót
36	<i>Fragaria</i> sp.	Frag.sp	80	<i>Vicia hirsuta</i> (L.) S. F. Gray	Vici.hir
37	<i>Galium mollugo</i> L.	Gali.mol	81	<i>Vicia sepium</i> L.	Vici.sep
38	<i>Galium verum</i> L.	Gali.ver	82	<i>Vicia tenuifolia</i> Roth	Vici.ten
39	<i>Hieracium pilosella</i> L.	Hier.pil	83	<i>Vincetoxicum hirundinaria</i> Medik.	Vinc.hir
40	<i>Hypericum perforatum</i> L.	Hype.per	84	<i>Viola collina</i> Besser	Viol.col
41	<i>Inula britannica</i> L.	Inul.bri	85	<i>Viola hirta</i> L.	Viol.hir
42	<i>Knautia arvensis</i> (L.) J. M. Coult.	Knau.arv	86	<i>Viola reichenbachiana</i> Jord. ex Boreau	Viol.rei
43	<i>Koeleria macrantha</i> (Ledeb.) Schult.	Koel.mac	87	<i>Viscaria vulgaris</i> Röhl.	Visc.vul
44	<i>Leucanthemum vulgare</i> Lam.	Leuc.vul			

Gęst. – gęstość objętościowa gleby

IT – indeks tolerancji

KPW<sub>w</sub> – kapilarna pojemność wodna gleby wyrażona wagowo

Ład. ciep. – ładunek ciepła

Mat.org – materia organiczna

MPW – maksymalna pojemność wodna

Nach. st. – nachylenie stoku

SE – błąd standardowy

WK – współczynnik koncentracji

Wys.hips. – wysokość hipsometryczna



## 10.2 Wykaz parametrów analiz statystycznych dotyczący danych z tabel: 4, 5, 6, 10

Lokalizacja danych	Opisywana cecha	Rodzaj testu statystycznego		Parametry testu	
		Podłoża	Jednostki fizjograficzne	Podłoża	Jednostki fizjograficzne
Tab. 4	Wysokość hipsometryczna	T. Kruskala-Wallis	T. Kruskala-Wallis	H=18.112 p≤0.001	H=56.57 p≤0.001
	Ładunek ciepła	T. Kruskala-Wallis	T. Kruskala-Wallis	H=4.100 p=0.129	H=23.21 p=0.001
	Mięższość gleby	T. Kruskala-Wallis	T. Kruskala-Wallis	H=12.335 p=0.002	H=22.72 p=0.001
	Gęstość <sub>obj</sub>	T. Tukeya	T. Kruskala-Wallis	błąd: MS międzygrup.=0.049 df=73	H=29.85 p≤0.001
	KPW <sub>w</sub>	T. Tukeya	T. Kruskala-Wallis	błąd: MS międzygrup.=0.098 df=73	H=28.51 p≤0.001
	Materia organiczna	T. Tukeya	T. Tukeya	błąd: MS międzygrup.=0.145 df=73	błąd: MS międzygrup.=0.134 df=69
	pH	T. Kruskala-Wallis	T. Kruskala-Wallis	H=51.09 p≤0.001	H=55.52 p≤0.001
Tab. 5	N	T. Kruskala-Wallis	T. Kruskala-Wallis	H=22.74 p≤0.001	H=29.32 p≤0.001
	Mg	T. Kruskala-Wallis	T. Kruskala-Wallis	H=29.91 p≤0.001	H=51.15 p≤0.001
	Ca	T. Kruskala-Wallis	T. Kruskala-Wallis	H=45.96 p≤0.001	H=51.82 p≤0.001
	K	T. Kruskala-Wallis	T. Kruskala-Wallis	H=36.06 p≤0.001	H=42.56 p≤0.001
	Fe	T. Tukeya	T. Tukeya	błąd: MS międzygrup.=0.176 df=73	błąd: MS międzygrup.=0.120 df=69
	Ni	T. Kruskala-Wallis	T. Tukeya	H=55.03 p≤0.001	błąd: MS międzygrup.=0.359 df=69
	Cr	T. Kruskala-Wallis	T. Kruskala-Wallis	H=56.28 p≤0.001	H=57.30 p≤0.001

Lokalizacja danych	Opisywana cecha	Rodzaj testu statystycznego		Parametry testu	
		Podłoża	Jednostki fizjograficzne	Podłoża	Jednostki fizjograficzne
Tab. 5	Mn	T. Tukeya	T. Tukeya	błąd: MS międzygrup.=0.150 df=73	błąd: MS międzygrup.=0.131 df=69
	Co	T. Tukeya	T. Kruskala-Wallis	błąd: MS międzygrup.=0.193 df=73	H=60.09 p≤0.001
	Cu	T. Kruskala-Wallis	T. Kruskala-Wallis	H=17.94 p≤0.001	H=31.60 p≤0.001
	Zn	T. Kruskala-Wallis	T. Kruskala-Wallis	H=4.48 p=0.107	H=35.95 p≤0.001
Tab. 6	Mg	T. Tukeya	T. Kruskala-Wallis	błąd: MS międzygrup.=0.183 df=73	H=60.17 p≤0.001
	Ca	T. Kruskala-Wallis	T. Kruskala-Wallis	H=46.57 p≤0.001	H=48.86 p≤0.001
	Mg/Ca	T. Kruskala-Wallis	T. Kruskala-Wallis	H=65.68 p≤0.001	H=66.51 p≤0.001
	P	T. Kruskala-Wallis	T. Tukeya	H=25.19 p≤0.001	błąd: MS międzygrup.=0.181 df=69
	K	T. Tukeya	T. Tukeya	błąd: MS międzygrup.=0.175 df=73	błąd: MS międzygrup.=0.131 df=69
	Fe	T. Kruskala-Wallis	T. Kruskala-Wallis	H=50.99 p≤0.001	H=57.02 p≤0.001
	Ni	T. Tukeya	T. Tukeya	błąd: MS międzygrup.=0.397 df=73	błąd: MS międzygrup.=0.278 df=69
	Cr	T. Kruskala-Wallis	T. Kruskala-Wallis	H=63.29 p≤0.001	H=64.69 p≤0.001
	Mn	T. Kruskala-Wallis	T. Tukeya	H=20.81 p≤0.001	błąd: MS międzygrup.=0.221 df=69
	Co	T. Tukeya	T. Tukeya	błąd: MS międzygrup.=0.298 df=73	błąd: MS międzygrup.=0.149 df=69
	Cu	T. Kruskala-Wallis	T. Kruskala-Wallis	H=38.71 p≤0.001	H=40.31 p≤0.001
	Zn	T. Kruskala-Wallis	T. Kruskala-Wallis	H=2.16 p=0.340	H=21.18 p=0.002

Lokalizacja danych	Opisywana cecha	Rodzaj testu statystycznego		Parametry testu	
		Podłoża	Jednostki fizjograficzne	Podłoża	Jednostki fizjograficzne
Tab. 10	Zwarcie warstwy zielnej	T. Kruskala-Wallis	T. Kruskala-Wallis	H=14.04 p≤0.001	H=30.68 p≤0.001
	Biomasa ogółem	T. Kruskala-Wallis	T. Kruskala-Wallis	H=5.40 p=0.067	H=14.62 p=0.023
	Biomasa - zielne	T. Kruskala-Wallis	T. Kruskala-Wallis	H=13.07 p=0.002	H=26.66 p≤0.001
	Biomasa - zarodnikowe	T. Kruskala-Wallis	T. Kruskala-Wallis	H=6.64 p=0.036	H=10.79 p=0.095
	Liczba gatunków	T. Kruskala-Wallis	T. Kruskala-Wallis	H=3.46 p=0.177	H=14.67 p=0.023
	Współczynnik różnorodności H'	T. Kruskala-Wallis	T. Kruskala-Wallis	H=3.39 p=0.183	H=5.42 p=0.491
	Współczynnik równocенności J'	T. Kruskala-Wallis	T. Kruskala-Wallis	H=3.46 p=0.178	H=9.79 p=0.134

### 10.3 Wykaz parametrów analiz statystycznych dotyczący danych z tabeli 15

Gatunek	<i>E. cyparissias</i>	<i>G. verum</i>	<i>H. perforatum</i>	<i>S. ochroleuca</i>	<i>T. pulegioides</i>
Mg	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.041 df=66	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.056 df=49	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.034 df=21	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.020 df=13	T. Kruskala-Wallis H=26.00 p<0.001
Ca	T. Kruskala-Wallis H=42.37 p<0.001	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.053 df=49	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.068 df=21	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.069 df=13	T. Kruskala-Wallis H=24.97 p<0.001
K	T. Kruskala-Wallis H=13.61 p=0.001	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.025 df=49	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.031 df=21	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.016 df=13	T. Kruskala-Wallis H=1.96 p=0.376
Ni	T. Kruskala-Wallis H=60.20 p<0.001	T. Kruskala-Wallis H=39.36 p<0.001	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.244 df=21	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.169 df=13	T. Kruskala-Wallis H=29.67 p<0.001
Cr	T. Kruskala-Wallis H=10.86 p=0.004	T. Kruskala-Wallis H=0.79 p=0.674	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.410 df=21	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.062 df=13	T. Kruskala-Wallis H=5.65 p=0.059
Mn	T. Tukeya Błąd: MS międzygrup.=0.199 df=66	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.234 df=49	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.192 df=21	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.158 df=13	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.164 df=33
Co	T. Tukeya Błąd: MS międzygrup.=0.174 df=66	T. Kruskala-Wallis H=0.56 p=0.756	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.417 df=21	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.052 df=13	T. Kruskala-Wallis H=14.86 p=0.001
Cu	T. Kruskala-Wallis H=1.21 p=0.547	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.044 df=49	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.058 df=21	T. Kruskala-Wallis H=11.25 p=0.004	T. Kruskala-Wallis H=2.00 p=0.368
Zn	T. Kruskala-Wallis H=31.37 p<0.001	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.162 df=49	T. Kruskala-Wallis H=15.41 p<0.001	T. Kruskala-Wallis H=8.61 p=0.014	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.096 df=33
Fe	T. Kruskala-Wallis H=1.470 p=0.480	T. Kruskala-Wallis H=2.50 p=0.287	T. Kruskala-Wallis H=1.80 p=0.407	T. Kruskala-Wallis H=0.46 p=0.795	T. Kruskala-Wallis H=0.57 p=0.753
Mg/Ca	T. Kruskala-Wallis H=60.20 p<0.001	T. Kruskala-Wallis H=36.28 p<0.001	T. Kruskala-Wallis H=20.16 p<0.001	T. Kruskala-Wallis H=13.24 p=0.001	T. Kruskala-Wallis H=29.88 p<0.001

## 10.4 Wykaz parametrów analiz statystycznych dotyczący rysunków 30A–L oraz 31A–L

Lokalizacja danych	Opisywana zmienna	Populacje – gleba granitowa	Populacje – gleba serpentynitowa	Populacje między podłożami
		Parametry testów statystycznych		
<i>Euphorbia cyparissias</i>				
Rys. 30A	Przyrost pędu	T. Kruskala-Wallis H=5.46 p=0.65	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.025 df=12	Prz: T. t Studenta; t=2.10 df=8 p=0.069 N1: T. t Studenta; t=0.84 df=8 p=0.423 Strz: T. t Studenta; t=-0.91 df=8 p=0.388
Rys. 30B	s.m. pędu	Test Kruskala-Wallis H=4.47 p=0.107	T. Kruskala-Wallis H=8.44 p=0.015	Prz: T. t Studenta; t=1.56 df=8 p=0.156 N1: T. t Studenta; t=1.01 df=8 p=0.344 Strz: T. U Manna-Whitneya Z= -0.84 p=0.403
Rys. 30C	s.m. korzeni	T. Kruskala-Wallis H=2.35 p=0.309	T. Kruskala-Wallis H=5.59 p=0.061	Prz: T. t Studenta; t=2.10 df=8 p=0.069 N1: T. t Studenta; t=1.70 df=8 p=0.128 Strz: T. U Manna-Whitneya Z=0.00 p=1.000
Rys. 30D	Mg	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.007 df=9	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.<0.001 df=10	Prz: T. t Studenta; t=-19.18 df=6 p<0.001 N1: T. t Studenta; t=-6.64 df=8 p<0.001 Strz: T. t Studenta; t=-6.62 df=5 p=0.001
Rys. 30E	Ca	T. Kruskala-Wallis H=2.52 p=0.283	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.008 df=10	Prz: T. U Manna-Whitneya Z=1.30 p=0.194 N1: T. t Studenta; t=4.05 df=8 p=0.004 Strz: T. t Studenta; t=3.06 df=5 p=0.028
Rys. 30F	K	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.004 df=9	T. Kruskala-Wallis H=0.43 p=0.808	Prz: T. t Studenta; t=-0.33 df=6 p=0.753 N1: T. t Studenta; t=-2.05 df=8 p=0.075 Strz: T. t Studenta; t=-0.27 df=5 p=0.797
Rys. 30G	Ni	T. Kruskala-Wallis H=0.80 p=0.671	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.008 df=10	Prz: T. t Studenta; t=-17.54 df=6 p<0.001 N1: T. U Manna-Whitneya Z= -2.51 p=0.012 Strz: T. t Studenta; t=-9.78 df=5 p<0.001
Rys. 30H	Mn	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.008 df=9	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.005 df=10	Prz: T. t Studenta; t=9.67 df=6 p<0.001 N1: T. t Studenta; t=9.15 df=8 p<0.001 Strz: T. t Studenta; t=4.52 df=5 p=0.006
Rys. 30I	Co	T. Kruskala-Wallis H=4.24 p=0.120	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.41 df=10	Prz: T. U Manna-Whitneya Z= -1.54 p=0.124 N1: T. U Manna-Whitneya Z= -1.69 p=0.091 Strz: T. U Manna-Whitneya Z= -0.53 p=0.596

Lokalizacja danych	Opisywana zmienna	Populacje – gleba granitowa	Populacje – gleba serpentynitowa	Populacje między podłożami
		Parametry testów statystycznych		
Rys. 30J	Cu	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.008 df=9	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.005 df=10	Prz: T. t Studenta; t= -1.16 df=6 p=0.292 N1: T. t Studenta; t= -1.28 df=8 p=0.237 Strz: T. t Studenta; t=0.54 df=5 p=0.612
Rys. 30K	Zn	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.010 df=9	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.005 df=10	Prz: T. t Studenta; t=8.25 df=6 p<0.001 N1: T. t Studenta; t=5.07 df=8 p<0.001 Strz: T. t Studenta; t=10.40 df=5 p<0.001
Rys. 30L	Fe	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.004 df=9	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.003 df=10	Prz: T. t Studenta; t= -5.09 df=6 p=0.002 N1: T. t Studenta; t= -3.11 df=8 p=0.014 Strz: T. t Studenta; t=1.24 df=5 p=0.269
<b><i>Galium verum</i></b>				
Rys. 31A	Przyrost pędu	Test Kruskala-Wallisa H=5.46 p=0.065	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.004 df=12	N1: T. U Manna-Whitneya Z= 0.41 p=0.676 N2: T. U Manna-Whitneya Z= 2.51 p=0.012 Strz: T. U Manna-Whitneya Z= 0.00 p=1.00
Rys. 31B	s.m. pędu	Test Kruskala-Wallisa H=4.47 p=0.107	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.<0.001 df=12	N1: T. U Manna-Whitneya Z= -2.21 p=0.027 N2: T. U Manna-Whitneya Z= 0.00 p=1.00 Strz: T. t Studenta; t=1.24 df=5 p=0.269
Rys. 31C	s.m. korzeni	Test Kruskala-Wallisa H=2.35 p=0.309	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.<0.001 df=12	N1: T. t Studenta; t=0.97 df=8 p=0.363 N2: T. t Studenta; t=1.71 df=8 p=0.126 Strz: T. t Studenta; t=0.44 df=8 p=0.669
Rys. 31D	Mg	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.001 df=12	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.003 df=12	N1: T. t Studenta; t= -11.31 df=8 p<0.001 N2: T. t Studenta; t= -14.24 df=8 p<0.001 Strz: T. t Studenta; t= -12.52 df=8 p<0.001
Rys. 31E	Ca	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.001 df=12	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.002 df=12	N1: T. t Studenta; t=8.69 df=8 p<0.001 N2: T. t Studenta; t=7.22 df=8 p<0.001 Strz: T. t Studenta; t=5.37 df=8 p=0.001
Rys. 31F	K	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.001 df=12	T. Kruskala-Wallisa H=6.48 p=0.039	N1: T. t Studenta; t= -3.34 df=8 p=0.010 N2: T. t Studenta; t= -2.59 df=8 p=0.032 Strz: T. t Studenta; t=1.24 df=5 p=0.269
Rys. 31G	Ni	Test Kruskala-Wallisa H=4.34 p=0.114	T. Kruskala-Wallisa H=1.68 p=0.432	N1: T. t Studenta; t= -8.74 df=8 p<0.001 N2: T. t Studenta; t= -6.82 df=8 p<0.001 Strz: U Manna-Whitneya Z= -2.51 p=0.012

Lokalizacja danych	Opisywana zmienna	Populacje – gleba granitowa	Populacje – gleba serpentynitowa	Populacje między podłożami
		Parametry testów statystycznych		
Rys. 31H	Cr	Test Kruskala-Wallis H=2.24 p=0.326	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.48 df=12	N1: T. U Manna-Whitneya Z= -2.37 p=0.018 N2: T. t Studenta; t= -3.88 df=8 p=0.005 Strz: T. t Studenta; t=1.24 df=5 p=0.269
Rys. 31I	Mn	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.004 df=12	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.002 df=12	N1: T. t Studenta; t=9.29 df=8 p<0.001 N2: T. t Studenta; t=9.81 df=8 p<0.001 Strz: T. t Studenta; t=18.22 df=8 p<0.001
Rys. 31J	Co	Test Kruskala-Wallis H=9.56 p=0.008	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.008 df=12	N1: U Manna-Whitneya Z= -2.54 p=0.011 N2: U Manna-Whitneya Z= -1.26 p=0.209 Strz: T. t Studenta; t= -1.57 df=8 p=0.156
Rys. 31K	Cu	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.003 df=12	T. Kruskala-Wallis H=7.28 p=0.026	N1: T. t Studenta; t=0.81 df=8 p=0.044 N2: T. t Studenta; t=1.11 df=8 p=0.299 Strz: U Manna-Whitneya Z= 1.88 p=0.060
Rys. 31L	Zn	Test Kruskala-Wallis H=0.080 p=0.961	T. Tukeya; Błąd: MS międzygrup.=0.002 df=12	N1: T. t Studenta; t=25.72 df=8 p<0.001 N2: T. t Studenta; t=18.19 df=8 p<0.001 Strz: U Manna-Whitneya Z=2.51 p=0.012

## Streszczenie

Ciepłolubne murawy serpentynitowe stanowią niezwykle cenne przyrodniczo zbiorowiska roślinne. Wykształcone zostały na skałach serpentynitowych, które w Polsce ograniczają się do obszaru Dolnego Śląska. Szereg specyficznych właściwości gleb serpentynitowych określany jest terminem *kompleks serpentynitowy*. Gleby serpentynitowe charakteryzują się m.in. wysokimi koncentracjami magnezu oraz niklu i niektórych innych metali ciężkich, a także odwrotnymi niż zazwyczaj proporcjami między magnezem i wapniem. Badane obiekty były fragmentami muraw na trzech typach podłoża skalnych: serpentynitowym, granitowym oraz wapiennym i wszystkie miały charakter wysp środowiskowych w krajobrazie kulturowym. Celem niniejszej pracy było porównanie roślinności i analiza reakcji gatunków należących do lokalnej flory ciepłolubnych muraw z serpentynitów i odmiennych podłoży skalnych na czynniki kompleksu serpentynitowego. Wskazano właściwości siedlisk, które różniły badane rodzaje podłoża oraz znacząco wpływały na kompozycję gatunkową muraw. Typ podłoża skalnego istotnie wpływał na akumulowanie makro- i mikrośladników oraz pierwiastków śladowych z grupy metali ciężkich przez badane gatunki. Uzyskane wyniki mogą przyczynić się do uzupełnienia wiedzy na temat zależności między właściwościami siedlisk a florą ciepłolubnych muraw oraz reakcją roślin na czynniki kompleksu serpentynitowego.

**Słowa kluczowe:** ciepłolubne murawy, gleby serpentynitowe, kompozycja gatunkowa, tolerancja na nikiel, stosunek Mg/Ca

## Abstract

Dry serpentine grasslands are of extremely high natural value among plant communities. They were made of rare serpentine rocks, which occurrence is limited to area of Lower Silesia in Poland. Plenty of their specifications are termed *serpentine complex*. Serpentine soils are characterized by high magnesium, nickel and some others heavy metals concentration as well as the opposite to the usual ratio between magnesium and calcium. Examined objects were the fragments of grasslands growing on three types of bedrocks: serpentine, granite and limestone. Moreover they were all habitat islands in the anthropogenic landscape. The aim of this work was to compare vegetation and analyze the response of plant populations to factors of serpentine complex. Investigated species belonged to local flora of dry grasslands from serpentinites and other bedrocks. It was indicated habitat properties which differentiated examined type of bedrocks as well as significantly affected species composition of grasslands. It was found that accumulation of micro- and macroelements and trace elements from the group of heavy metals by examined species were significantly influenced by type of bedrock. The obtained results may contribute to supplementing the knowledge about the relationship between the habitat properties and the flora of dry grasslands and the reaction of the plants to the factors of the serpentine complex.

**Key words:** dry grasslands, serpentine soils, species composition, tolerance to Ni, Mg/Ca ratio