



**UNIwersytet  
Przyrodniczy  
we Wrocławiu**

**Załącznik 3a**

**AUTOREFERAT**

**Przebieg pracy zawodowej oraz opis dorobku naukowego  
i osiągnięć naukowo-badawczych**

**dr inż. Katarzyna Szopka**

**Wydział Przyrodniczo-Technologiczny  
Instytut Nauk o Glebie i Ochrony Środowiska**

**Wrocław 2017**

## Spis treści

I. Przebieg pracy zawodowej .....	3
II. Opis osiągnięcia naukowo-badawczego, na które składa się jednotematyczny cykl publikacji .....	4
II.1. Wykaz prac naukowych wchodzących w skład jednotematycznego cyklu publikacji .....	4
II.2. Wprowadzenie .....	5
II.3. Główne cele badawcze osiągnięcia naukowego .....	6
II.4. Obszar badań oraz zastosowana metodyka.....	7
II.4.1. Metodologia poboru próbek glebowych.....	9
II.4.2. Analizy laboratoryjne .....	9
II.4.3. Analiza i interpretacja wyników.....	10
II.5. Najważniejsze wyniki badań .....	11
II.6. Wnioski .....	19
II.7. Bibliografia .....	21
III. Omówienie pozostałych osiągnięć badawczo-naukowych .....	23
IV. Wskaźniki parametryczne dorobku naukowego .....	37

## I. Przebieg pracy zawodowej

1. Imię i nazwisko: **Katarzyna Jolanta Szopka**

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe:

- magister inżynier rolnictwa, 1994, Wydział Rolniczy Akademii Rolniczej we Wrocławiu
- doktor nauk rolniczych w zakresie agronomii, 1999, Wydział Rolniczy Akademii Rolniczej we Wrocławiu

Tytuł rozprawy doktorskiej: Geneza, skład i właściwości gleb wytworzonych z piaskowców na terenie Gór Stołowych.

Promotor: prof. dr hab. Leszek Szerszeń, AR Wrocław

Recenzenci: prof. dr hab. Piotr Skłodowski, Politechnika Warszawska  
prof. dr hab. Tadeusz Chodak, AR Wrocław

3. Przebieg pracy zawodowej w jednostkach naukowych:

1.07.1999 – do chwili obecnej, adiunkt, Instytut Nauk o Glebie i Ochrony Środowiska, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu (mianowanie, umowa o pracę na czas nieokreślony)

## II. Opis osiągnięcia naukowo-badawczego, na które składa się jednotematyczny cykl publikacji

Tytuł osiągnięcia naukowego:

### CZYNNIKI DETERMINUJĄCE WŁAŚCIWOŚCI I STAN GLEB GÓRSKICH NARAŻONYCH NA ZANIECZYSZCZENIA POWIETRZA NA PRZYKŁADZIE KARKONOSZY

#### II.1. Wykaz prac naukowych wchodzących w skład jednotematycznego cyklu publikacji

1. Karczewska A., Bogacz A., Kabała C., **Szopka K.**, Duszyńska D. 2006. Methodology of soil monitoring for a forested zone of the Karkonosze National Park – with reference to the diversity of soil properties. Polish J. of Soil Science, 39/2: 117-129 – **6 pkt**<sup>1</sup> (mój udział procentowy szacuję na 45%, mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: koncepcji pracy, badaniach terenowych i laboratoryjnych, przygotowaniu pracy do druku)
2. **Szopka K.**, Kabała C., Karczewska A., Jezierski P., Bogacz A., Waroszewski J. 2016. The pools of soil organic carbon accumulated in the surface layers of forest soils in the Karkonosze Mountains, SW Poland. Soil Science Annual, Vol. 67 (2): 46-56 – **14 pkt** (mój udział procentowy szacuję na 45%; mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: koncepcji pracy, badaniach terenowych i laboratoryjnych, przygotowaniu pracy do druku)
3. **Szopka K.**, Kabała C., Karczewska A., Bogacz A., Jezierski P. 2010. Pools of available nutrients in soils from different altitudinal forest zones located in a monitoring system of the Karkonosze Mountains National Park, Poland. Polish J. of Soil Science, vol. 43/2: 173-188 – **6 pkt** (mój udział procentowy szacuję na 50%; mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: koncepcji pracy, badaniach terenowych i laboratoryjnych, przygotowaniu pracy do druku)
4. **Szopka K.**, Karczewska A., Kabała C. 2011. Mercury accumulation in the surface layers of mountain soils: A case study from the Karkonosze Mountains, Poland. Chemosphere 83: 1507-1512 – **32 pkt (IF 3,206 z 2011)** (mój udział procentowy szacuję na 60%; mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: koncepcji pracy, badaniach terenowych i laboratoryjnych, przygotowaniu pracy do druku)
5. **Szopka K.**, Karczewska A., Jezierski P., Kabała C. 2013. Spatial distribution of lead in the surface layers of mountain forest soils, an example from Karkonosze National Park, Poland. Geoderma, 192: 259-268 – **40 pkt (IF 2,509/2013)** (mój udział procentowy szacuję na 60%; mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: koncepcji pracy, badaniach terenowych i laboratoryjnych, przygotowaniu pracy do druku)

---

<sup>1</sup> Punktacja zgodnie z rokiem publikacji w czasopismach z listy czasopism punktowanych MNiSW, część A i B

6. **Szopka K.**, Karczewska A., Kabała C., Kulczyk K. 2011. Siarka siarczanowa w glebach górnoreglowych borów świerkowych Karkonoskiego Parku Narodowego. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, z.50: 61-70 – **6 pkt** (mój udział procentowy szacuję na 60%: mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: koncepcji pracy, badaniach terenowych i laboratoryjnych, przygotowaniu pracy do druku)

## II.2. Wprowadzenie

Pokrywa glebowa Karkonoszy kształtuje się pod wpływem naturalnych czynników środowiskowych, przede wszystkim klimatu i roślinności, oraz wskutek działalności człowieka. Podstawowe i pierwotne znaczenie mają czynniki klimatyczne związane z termiką i wilgotnością, które bezpośrednio lub w sprzężeniu z szatą roślinną sterują intensywnością zjawisk wietrzenia, procesów morfodynamicznych oraz procesów glebowych [Kabała i in. 2013].

W rejonie Karkonoszy brak jest obecnie większych przemysłowych źródeł emisji zanieczyszczeń i dużych miast. Skupiska ludzkie i nieliczne źródła emisji przemysłowej zlokalizowane są w miastach na obrzeżach Karkonoszy. Na stężenia zanieczyszczeń w powietrzu wpływają nie tylko emisje lokalne, ale również napływ zanieczyszczeń z innych obszarów, w tym z Kotliny Turoszowskiej, gdzie znajdują się elektrownie wytwarzające energię w oparciu o spalanie węgla brunatnego i inne zakłady przemysłowe. Wieloletnie badania prowadzone od lat 70. XX wieku potwierdzały wysokie stężenia tlenków siarki i azotu oraz pierwiastków śladowych [Drozd i in. 1998] w powietrzu napływającym nad Karkonosze. Systemy górskie pełnią funkcję ekranizującą, co jest powodem znacznej akumulacji zanieczyszczeń w glebach [Kmieć i in. 1994, Skiba i in. 1994, 1995]. Wprawdzie w ostatnich 30 latach wielkość emisji zanieczyszczeń do atmosfery w Europie i w Polsce uległa radykalnemu zmniejszeniu [Kaczor, Brodowska 2008], to jednak na obszarach górskich akumulacja zanieczyszczeń nadal stanowić może poważny problem ekologiczny.

Rezultatem długoletnich emisji zanieczyszczeń w Sudetach były drastyczne zmiany w drzewostanach Gór Izerskich oraz regła górnego na obszarze Karkonoskiego Parku Narodowego (KPN), jakie wystąpiły w latach 70. i 80. ubiegłego wieku, określane terminem klęski ekologicznej. Polegały one na znacznym pogorszeniu stanu sanitarnego drzewostanów oraz na całkowitych wylesieniach niektórych powierzchni [Danielewicz i in. 2002]. Widoczne uszkodzenia drzewostanów wystąpiły na około 67% powierzchni leśnej Karkonoskiego Parku Narodowego, w tym najwięcej uszkodzonych drzew zanotowano w reglu górnym [Raj 2014].

Przyczyny zamierania drzewostanów były złożone i obejmowały zarówno elementy abiotyczne, jak biotyczne. Wśród najważniejszych czynników, które doprowadziły do naruszenia równowagi ekosystemów, wymienia się silne oddziaływanie antropopresji, związanej z emisją kwaśnych gazów, aerozoli oraz pyłów [Zwoździak i in. 1995, Skiba i in. 1994], w tym między innymi wysokie stężenia metali ciężkich w opadach atmosferycznych, zwłaszcza w połączeniu z ich kwaśnym odczynem [Sienkiewicz i in. 2005]. Metale ciężkie podlegają akumulacji w glebach, a ich zawartość jest nie tylko ważnym wskaźnikiem antropopresji, ale jednocześnie czynnikiem wpływającym na stan ekosystemów, zwłaszcza tych,

których równowaga została naruszona wskutek działania innych czynników niekorzystnych. Silnie kwaśny odczyn stwarza warunki dla przechodzenia metali ciężkich do roztworu glebowego i ich pobierania przez rośliny [Kabata-Pendias A., Pendias H. 1999]. Dodatkowym czynnikiem predyspozycyjnym, który przyczynił się do zamierania drzewostanów świerkowych w Karkonoszach, było przekształcanie naturalnych zbiorowisk leśnych, w antropogeniczne monokultury świerkowe, co zapoczątkowano około 200 lat temu [Raj 2014].

W ostatnich 20 latach w mocno zmienionym środowisku przyrodniczym Karkonoszy obserwuje się zjawiska naturalnej regeneracji ekosystemów leśnych, prowadzone są także prace odnowieniowe mające na celu odtwarzanie lub kształtowanie na nowo zdegradowanych ekosystemów. Procesy zachodzące w tych warunkach są niezwykle interesujące zarówno z punktu widzenia poznawczego, naukowego, jak i praktycznego. W celu ich obserwacji i poznania kierunków oraz dynamiki zmian zachodzących w ekosystemach regenerowanych, utworzony został na terenie Parku kompleksowy system monitoringu, obejmujący między innymi monitoring gleb [Danielewicz i in. 2002, Karczewska i in. 2007]. Gleby stanowią jeden z zasadniczych elementów ekosystemów leśnych, a ich właściwości mają kluczowe znaczenie dla żywotności, produktywności i składu gatunkowego lasu oraz jego stanu ekologicznego [Szopka 2007]. Szczególną rolę w glebach pełni materia organiczna, która stanowi nie tylko źródło składników odżywczych dla roślin oraz czynnik decydujący o właściwościach sorpcyjnych gleb, ale jest także ważnym elementem w obiegu węgla, wpływającym na bilans gazów cieplarnianych.

Badania właściwości gleb w warunkach narażenia na oddziaływanie zanieczyszczeń powietrza, a także na etapie odtwarzania ekosystemów zdegradowanych, powinny uwzględniać zarówno zasobność w składniki odżywcze, jak i stężenia składników niepożądanych, a także zawartość w glebie materii organicznej oraz kierunki i dynamikę jej przemian.

### II.3. Główne cele badawcze osiągnięcia naukowego

Celem prowadzonych badań było określenie związków między czynnikami siedliskowymi – biotycznymi i abiotycznymi, z uwzględnieniem bezpośredniego i pośredniego wpływu człowieka, a właściwościami gleb Karkonoszy, w tym zasobnością w materię organiczną, troficznością oraz wybranymi parametrami charakteryzującymi stan zanieczyszczenia. Szczególną uwagę w prowadzonych badaniach zwrócono na potencjalny wpływ na właściwości gleb transgranicznych oraz lokalnych zanieczyszczeń powietrza, których oddziaływanie może być specyficznie wysokie na obszarach górskich tworzących bariery orograficzne.

Badania gleboznawcze prowadzone w poprzednich latach na terenie Karkonoszy wykazały szereg niekorzystnych zjawisk w środowisku glebowym, w tym silne zakwaszenie i wysoką koncentrację glinu wymiennego, które mogą powodować upośledzenie wzrostu roślin i wpływać na aktywność mikrobiologiczną, a także niską zawartość kationów wymiennych (szczególnie wapnia i magnezu), co decyduje o słabych zdolnościach buforowych gleb. Opisywano także wzrost koncentracji azotu na niektórych obszarach, umożliwiającą wkroczenie obcych gatunków roślin, wzrost całkowitej zawartości siarki i stężenia siarki siarczanowej oraz wzrost koncentracji niektórych metali ciężkich. Wnioski z prowadzonych badań często były niespójne lub wręcz sprzeczne, prawdopodobnie z powodu

odmiennej metodyki prac terenowych, w różny sposób uwzględniającej przestrzenną zmienność właściwości gleb. Obserwacje te potwierdzają, że właściwie opracowana, jednolita metodyka prac terenowych stanowi kluczowy element w badaniach poświęconych analizie zmienności właściwości gleb w przestrzeni i czasie, i ma fundamentalne znaczenie zwłaszcza w przypadku prac realizowanych w rejonach górskich.

Istotnym celem badań wstępnych przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy było przetestowanie założeń metodycznych do prac terenowych, na potrzeby monitoringu ekosystemów leśnych Karkonoszy, a w szczególności – rozpoznanie i ocena lokalnej zmienności gleb górskich. Znajomość tej zmienności jest niezbędna dla właściwej interpretacji wyników ilustrujących przestrzenne zróżnicowanie właściwości gleb, w tym gleb różniących się typologicznie, a także dla określenia – w przyszłości – kierunków i dynamiki zmian środowiska glebowego.

Zasadniczym celem badań było uzyskanie wiedzy o aktualnym zróżnicowaniu wybranych właściwości poziomów powierzchniowych gleb leśnych Karkonoszy w układzie przestrzenno-wysokościowym, jak również rozpoznanie czynników wpływających na to zróżnicowanie.

Uzyskane wyniki mają na celu stworzenie bazy wyjściowej dla śledzenia zmian właściwości gleb w mocno zmienionych ekosystemach leśnych i nieleśnych, w których w tej chwili występują zjawiska naturalnej regeneracji lub prowadzi się intensywne prace odnowieniowe, co pozwoli na ocenę słuszności podjętych działań odtwarzających lub na nowo kształtujących ekosystemy.

#### **II.4. Obszar badań oraz zastosowana metodyka**

Badania prowadzono na terenie Karkonoszy, głównie w obrębie Karkonoskiego Parku Narodowego. Karkonosze tworzą najwyższe pasmo górskie Sudetów i zajmują powierzchnię około 650 km<sup>2</sup>. Dominującą skałą na obszarze Karkonoskiego Parku Narodowego jest granit równoziarnisty i porfirowaty, tworzący centralny masyw między skałami metamorficznymi Wschodnich Karkonoszy i Gór Izerskich.

Specyficzny klimat Karkonoszy w bezpośredni sposób wpływa i kształtuje szatę roślinną, a pośrednio oddziałuje także na faunę [Raj 2014]. W rejon Karkonoszy najczęściej – 64% dni w roku – napływają wilgotne masy powietrza polarnomorskiego powodujące duże zachmurzenie i opady. Rzadziej na teren Karkonoszy napływają masy powietrza polarno-kontynentalnego (30% czasu), arktycznego – spływającego z północy oraz zwrotnikowego – z obszarów sąsiadujących z Europą od południa. Średnia temperatura roczna na tym obszarze waha się w granicach od 7,9 °C w dolnej partii stoków do 0,4 °C na Śnieżce. W Karkonoszach przeważają wiatry cyrkulacji południowo-zachodniej i południowej. Średni roczny opad wzrasta wraz z wysokością nad poziomem morza i wynosi 700-750 mm w piętrze pogórza do około 1500 mm w najwyższych partiach Karkonoszy [Gramsz i in. 2010]. Wilgotność powietrza, pionowa stratyfikacja termiczna oraz ruch wstępujący powietrza wymuszony barierą orograficzną gór powoduje wznoszenie wilgotnego powietrza w górę, co przejawia się wzrostem zachmurzenia i częstości występowania mgieł w wyższych partiach Karkonoszy, a także w obniżeniach śródgórskich – w porównaniu z pozycjami stokowymi [Sobik i in. 2013].

Roślinność Karkonoszy, podobnie jak innych gór, ma układ strefowy (piętrowy) jednak w Karkonoszach występuje obniżenie pionowego zasięgu poszczególnych pięter. Wpływ na taki stan mają dwa czynniki środowiskowe: północno-oceaniczne masy powietrza docierające nad Karkonosze oraz niewielkie wypiętrzenie masywu [Raj 2014].

Najniżej położone, do wysokości 500 m n.p.m., jest piętro pogórza. Piętro regła dolnego swoim zasięgiem obejmuje pas od wysokości 500 do 1000 m n.p.m. Na tych wysokościach naturalna roślinność, w tym kwaśna buczyna górską, została wyparta przez monokultury świerka w wyniku działalności gospodarczej człowieka. Od wysokości 1000 do 1250 m n.p.m. występuje piętro regła górnego, z naturalnymi borami świerkowymi, które stanowią najistotniejszy zespół leśny Karkonoskiego Parku Narodowego. Z wysokością las stopniowo zanika i przechodzi w piętro kosodrzewiny [Fabiszewski 1985].

W ostatnich dwustu latach na terenie Sudetów nastąpiło zasadnicze przekształcenie ekosystemów. W najwyższych strefach wysokościowych, szczególnie na wypłaszczeniach, naturalne drzewostany świerkowe lub zakrzewienia kosodrzewiny zostały zastąpione zbiorowiskami trawiastymi, wykorzystywanymi jeszcze do niedawna jako pastwiska. W niższych strefach wysokościowych naturalne lasy liściaste i mieszane zostały wycięte pod uprawy rolnicze lub zastąpione monokulturami świerkowymi [Danielewicz i in. 2013, Malkiewicz i in. 2016].

Wielkoobszarowe zamieranie lasów świerkowych pod koniec lat 80. na terenie Karkonoskiego Parku Narodowego wynikało z synergicznego wpływu skażeń przemysłowych i innych czynników szkodliwych, a w efekcie – podwyższonej podatności drzewostanów na ataki szkodliwych owadów i choroby. Na terenach objętych zamieraniem lasu od kilkunastu lat prowadzi się prace mające na celu odnowienie i przebudowę drzewostanów (uwzględniające między innymi restytucję lub wprowadzanie nowych gatunków). Zgodnie z Planem Ochrony KPN prace te powinny być wsparte stałym monitoringiem ekosystemów leśnych w celu śledzenia zmian żyzności oraz stopnia zanieczyszczenia gleb.

W roku 2002 na obszarze Parku wyznaczono 630 stałych powierzchni kołowych, rozmieszczonych w regularnej siatce 200 x 300 m, dla określenia stanu poszczególnych komponentów ekosystemu leśnego. W poszczególnych typach siedliskowych lasu i odpowiadającym im zbiorowiskach leśnych znalazły się powierzchnie monitoringowe w następującej liczbie: bór wysokogórski (BWG) – 374, bór mieszany górski (BMG) – 49, las mieszany górski (LMG) – 201, las górski (LG) – 1 powierzchnia. Sieć stałych powierzchni monitoringowych stała się też podstawą dla programu badań gleboznawczych [Danielewicz i in. 2002].



### II.4.1. Metodologia poboru próbek glebowych

Na potrzeby opracowań wchodzących w skład niniejszego cyklu, próbki glebowe pobierano z powierzchni stałego monitoringu ekosystemów leśnych Karkonoskiego Parku Narodowego, (określanych dla uproszczenia także jako „punkty monitoringowe”), zlokalizowanych w sieci prostokątów 200 x 300 m. Na każdej powierzchni, stanowiącej obszar o kształcie koła o średnicy 20 m opisano w terenie warunki topograficzne i cechy mikroreliefu, które wpływają na kształtowanie się lokalnej zmienności gleb, jak również dominujący typ drzewostanu, typ gleby oraz średnią miąższość ściółki.

W badaniach gleboznawczych powszechnie przyjmuje się pobieranie próbek glebowych z wyodrębnionych poziomów genetycznych, jednak w przypadku silnej typologicznej zmienności gleb taki sposób opróbowania praktycznie uniemożliwiałby porównywanie wyników oraz utrudniał sporządzenie analizy przestrzennej zmienności badanych parametrów w ramach gradientu wysokościowo-klimatycznego i wpływu roślinności. Dlatego w prowadzonych badaniach zdecydowano się na pobór próbek glebowych ze ściśle określonych warstw gleby, o założonej miąższości, niezależnie od ich przynależności do poziomów genetycznych.

W pilotażowej fazie badań, w celu określenia lokalnej zmienności właściwości gleb, w obrębie każdej z wytypowanych kołowych powierzchni badawczych pobierano niezależne cztery próbki średnie z sekcji rozmieszczonych w północnej, południowej, wschodniej i zachodniej części powierzchni monitoringowej. Próbki pobierano z poziomów mineralnych 0-10 cm i 10-20 cm oraz z całego poziomu organicznego – próchnicy nadkładowej. Każdą z powyższych próbek uzyskiwano jako próbkę uśrednioną, to jest otrzymaną w wyniku zmieszania kilku podpróbek pobranych w promieniu około 2 m. Próbki pobierano przy pomocy laski glebowej, tak, aby w minimalnym stopniu zaburzyć funkcjonowanie ekosystemu na badanej powierzchni. W przypadku gleb organicznych próbki pobierano z głębokości 0-10 cm i 10-20 cm.

W dalszych badaniach, poświęconych analizie poszczególnych właściwości gleb i przedstawionych w kolejnych artykułach niniejszego cyklu, z każdej powierzchni monitoringowej pobierano próbki glebowe w sposób analogiczny do opisanego wyżej, ale wszystkie podpróbki mieszano, uzyskując jedną uśrednioną próbkę reprezentującą daną powierzchnię (punkt monitoringowy).

### II.4.2. Analizy laboratoryjne

W wysuszonych, zmielonych próbkach glebowych, po odsianiu frakcji szkieletowej (>2 mm), oznaczono następujące właściwości:

- odczyn pH w H<sub>2</sub>O i 1mol KCl·dm<sup>-3</sup>;
- zawartość węgla organicznego (C<sub>org</sub>) – metodą Tiurina; w próbkach organicznych zawartość materii organicznej oznaczono metodą wyżarzania w temperaturze 550 °C;
- zasobność w przyswajalny Mg – metodą Schachtschabela;
- zasobność w przyswajalny P, K – metodą Eghnera-Riehma;

- zbliżone do całkowitych zawartości Pb, Cu, Zn, Cd oznaczono po rozтворzeniu próbek w mieszaninie stężonych kwasów HNO<sub>3</sub> oraz HCl (w stosunku 3:1), w warunkach mineralizacji wspomaganiej mikrofalowo, w systemie wysokociśnieniowym. Stężenia metali w analitach oznaczono metodą płomieniową AAS na spektrofotometrze PU 9100X. W celu walidacji metod analitycznych wykorzystano 3 certyfikowane materiały referencyjne i wzorce wewnętrzne;
- w wybranych próbkach oznaczono zawartość Hg – bezpośrednio w próbkach stałych na aparacie Nippon MA-2, wykorzystującym metodę zimnych par CV-AAS. Do walidacji metody również zastosowano 3 materiały certyfikowane
- zawartość siarki siarczanowej oznaczono w wodnych ekstraktach gleb, nefelometrycznie z BaCl<sub>2</sub>.

### II.4.3. Analiza i interpretacja wyników

Aby umożliwić analizę przestrzenno-wysokościową właściwości gleb, powierzchniowo monitoringowe podzielono na trzy podstawowe strefy wysokościowe: strefę regła górnego >1000 m n.p.m., wyższą część regła dolnego 750-1000 m n.p.m. oraz dolną część regła dolnego 500-750 m n.p.m. Bardzo specyficzny charakter strefy regła górnego, z występującymi tam łąkami wysokogórnymi i pojawiającą się w najwyższych położonych punktach kosodrzewiną, spowodował wydzielenie w tej strefie dwóch podstref: 1000-1250 m n.p.m. oraz >1250 m n.p.m., co ilustruje rysunek 1 w publikacji nr 3. Jedynie w przypadku analizy przestrzenno-wysokościowej zawartości rtęci w glebach zastosowano podział na 3 strefy wysokościowe, zlokalizowane tylko w wyższych partiach Karkonoszy.

Uzyskane wyniki poddano obróbce statystycznej. W badaniach pilotażowych dla każdej powierzchni obliczono wartości średnie oraz odchylenie standardowe SD badanych parametrów. Określono też przedziały ufności wyników dla poszczególnych właściwości gleb, zależnie od uwzględnianej liczby próbek reprezentujących daną powierzchnię lub grupę powierzchni.

W pozostałych pracach dla każdego z badanych parametrów charakteryzujących właściwości gleb obliczono podstawowe charakterystyki statystyczne. W celu oceny istotności różnic wyników w odniesieniu do wyznaczonych stref wysokościowych oraz wydzielonych poziomów i warstw gleby (ściółki, 0-10 cm i 10-20 cm), zastosowano metodę analizy wariancji ANOVA dla  $p < 0,05$ . Analizę statystyczną wykonywano z wykorzystaniem programu Statistica 9.00.

W celu sporządzenia przestrzennej analizy właściwości badanych gleb, dla niektórych parametrów wykonano mapy przy użyciu programu geostatystycznego ESRI Arc Editor 10.0.

Interpretacja wyników obejmowała zarówno analizę zawartości (stężeń) poszczególnych składników gleby (materii organicznej, przyswajalnych form składników pokarmowych oraz toksycznych pierwiastków śladowych i siarki), jak również analizę ich zasobów (puli zgromadzonej w glebie).

Zasoby poszczególnych składników obliczono dla warstwy gleby do głębokości 0-20 cm, sumując zasoby zgromadzone w ściółce i w warstwach 0-10

cm i 10-20 cm. Gęstość objętościową gleby w poszczególnych warstwach niezbędna do tych obliczeń wyznaczono z wzoru Prevosta (2004), uwzględniającego zawartość materii organicznej. W wersji uproszczonej, w niektórych pracach, przyjęto typowe wartości gęstości objętościowej na poziomie wynikającym z analizy wzoru Prevosta oraz z literatury.

Ze względu na to, że kategorie zasobności gleb leśnych w składniki pokarmowe opierają się tradycyjnie na danych dla warstwy od 0 do 40 cm [Kocjan 1999], dodatkowo oszacowano średnie stężenia i zasoby przyswajalnych form fosforu, potasu i magnezu dla warstwy 0-40 cm, zakładając, że zawartość tych pierwiastków w warstwie 20-40 cm stanowi 25% ich zawartości w warstwie nadległej.

Czynnikiem dodatkowym, który uwzględniono przy szacowaniu zasobów materii organicznej i puli składników zakumulowanych na jednostkowej powierzchni terenu (1 m<sup>2</sup> lub 1 ha), jest stopień pokrycia powierzchni gładzami, określany w trakcie prac terenowych.

## II.5. Najważniejsze wyniki badań

### Analiza założeń do monitoringu w aspekcie lokalnej zmienności właściwości gleb na powierzchniach pilotażowych

(Karczewska A., Bogacz A., Kabała C., Szopka K., Duszyńska D. 2006. Methodology of soil monitoring for a forested zone of the Karkonosze National Park – with reference to the diversity of soil properties. Polish J. of Soil Science, 39, 2, 117-129)

Badania monitoringowe prowadzone na terenach górskich wymagają specyficznego podejścia metodycznego, gdyż warunki glebowe różnią się tu zasadniczo od panujących na obszarach nizinnych użytków rolnych oraz lasów. Nierównomierność rozmieszczenia korzeni drzew w glebie, także specyficzna rola koron drzew, które wskutek intercepcji modyfikują przestrzenne rozmieszczenie zanieczyszczeń pochodzących z atmosfery i trafiających wraz z opadem do gleby, a także brak homogenizacji, jaką zapewniają zwykle zabiegi uprawowe, są czynnikami decydującymi o tej zmienności. Gleby Parku wykazują ponadto silne zróżnicowanie ze względu na bogaty mezo- i mikrorelief stoków.

Lokalna zmienność właściwości gleb jest faktem silnie ograniczającym możliwość wykrywania trendów przestrzennych oraz zmian postępujących w czasie. Poziom ufności wyników uzyskiwanych dla danej powierzchni zależy od liczby odrębnie analizowanych, reprezentujących ją próbek. Niekiedy dopiero pobranie kilkudziesięciu próbek z jednej powierzchni umożliwia uzyskanie wiarygodnej wartości średniej. Jednak mnożenie liczby pobieranych i analizowanych niezależnie próbek jest niemożliwe na terenie parku narodowego ze względu na niekorzystne skutki, jakie mogłoby to spowodować w obrębie pokrywy glebowej i roślinnej na powierzchni monitoringowej, ale też ze względu na koszty analiz.

Celem badań pilotażowych było określenie lokalnej zmienności podstawowych właściwości gleb w obrębie 12 kołowych powierzchni monitoringowych, zlokalizowanych na wysokościach od 630 do 1220 m n.p.m. Stwierdzono, że miąższość ściółki w punktach poboru próbek zmieniała się

w zakresie od 1 do 22 cm. Cechą, której nie udało się sparametryzować, istotną zwłaszcza dla oszacowania zasobów węgla organicznego, jest istnienie w szczelinach między głazami „kieszeni” wypełnionych materia organiczną, niekiedy do głębokości znacznie przekraczającej 30 cm. Odchylenie standardowe SD zmierzonej miąższości ściółki na powierzchni gleb mineralnych przekraczało 40% wartości średniej.

Zmienność chemicznych właściwości gleb na powierzchniach pilotażowych została scharakteryzowana na przykładzie pH gleby, zawartości przyswajalnych form fosforu P oraz całkowitej zawartości Pb, Zn i Cu. Stwierdzono stosunkowo niewielką zmienność odczynu gleb w próbkach pobieranych z danej powierzchni monitoringowej. Odchylenie standardowe (SD) osiągnęło maksymalnie od 0,14 jednostki pH w poziomach 10-20 cm do 0,22 jednostki w poziomach próchnicy nadkładowej.

Zawartość przyswajalnych form fosforu, przeciwnie niż odczyn gleby, charakteryzowała się silnym zróżnicowaniem (odchylenie standardowe na poziomie 34-53%), zwłaszcza w poziomach organicznych, w których jednocześnie była wielokrotnie wyższa niż w poziomach mineralnych. Zawartość form przyswajalnych fosforu w poziomach mineralnych nie przekraczała  $11 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , podczas, gdy w poziomach organicznych wahała się w szerokich zakresach od 6 do  $250 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (przy średniej zawartości  $104 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ).

Znaczne zróżnicowanie lokalne stwierdzono również w odniesieniu do zawartości pierwiastków śladowych (Pb, Zn i Cu). Zawartość ołowiu w warstwach mineralnych wahała się w granicach od 20 to  $78 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , podczas, gdy w poziomach organicznych (ściółki) była znacznie wyższa i dochodziła do  $250 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Taką samą zależność stwierdzono dla pozostałych pierwiastków metalicznych: Zn i Cu, choć ich stężenia były niższe niż Pb. Bardzo niska gęstość objętościowa ściółki powoduje, że zasoby przyswajalnego fosforu oraz pierwiastków śladowych zgromadzonych w ściółce na jednostkowej powierzchni są bardzo zbliżone do zasobów tych składników zgromadzonych w warstwach mineralnych do głębokości 20 cm.

Badania pilotażowe wykazały, że wyniki uzyskiwane dla danej powierzchni monitoringowej, jeśli jest ona reprezentowana przez pojedynczą próbkę zbiorczą, nie mogą być traktowane jako w pełni reprezentatywne dla tej powierzchni, a przedziały ufności poszczególnych parametrów są bardzo szerokie. Jednak w dalszych badaniach monitoringowych, ze względów praktycznych i finansowych, konieczne było zastosowanie uproszczonej metodyki poboru próbek, to jest pobieranie jednej uśrednionej próbki z jednej powierzchni monitoringowej. Ogromnie ważne jest zatem staranne opróbowanie powierzchni, tak aby próbka uśredniona była rzeczywiście dla niej reprezentatywna, co na stokach górskich o bogatym reliefie i dużym pokryciu głazami, nastrocza poważnych problemów.

**Zasoby węgla organicznego zmagazynowane w poziomach powierzchniowych gleb leśnych Karkonoszy**

(Szopka K., Kabała C., Karczewska A., Jezierski P., Bogacz A., Waroszewski J. 2016. The pools of soil organic carbon accumulated in the surface layers of forest soils in the Karkonosze Mountains, SW Poland. – Soil Science Annual, Vol. 67 No. 2: 46-56)

Materia organiczna w glebach jest źródłem składników odżywczych dla roślin wyższych, wpływa na właściwości sorpcyjne gleb, kontroluje dostępność składników, zatem odgrywa kluczową rolę w funkcjonowaniu ekosystemów leśnych. Ponadto, glebowa materia organiczna jest istotnym elementem obiegu węgla i decyduje o bilansie oraz dynamice gazów cieplarnianych.

Zawartość materii organicznej w glebach zależy od wielu czynników determinujących wielkość produkcji biomasy i tempo jej rozkładu/akumulacji, a w szczególności od klimatu, wysokości nad poziomem morza, topografii terenu, warunków wodnych, budowy geologicznej, a także sposobu użytkowania terenu, a w przypadku obszarów leśnych – od typów siedliskowych lasu oraz rodzaju i wieku drzewostanu.

Celem badań była analiza przestrzennego zróżnicowania zawartości węgla organicznego w poziomach powierzchniowych gleb leśnych z uwzględnieniem gradientu wysokościowo-klimatycznego oraz strefowości roślinnej częściowo zmodyfikowanej działalnością człowieka, a także zamieraniem drzewostanów w wyniku klęski ekologicznej.

Wbrew oczekiwaniom, w badanych glebach Karkonoszy nie stwierdzono wyraźnej tendencji zróżnicowania miąższości ściółki wraz z wysokością nad poziomem morza. Średnia miąższość ściółki w obrębie poszczególnych powierzchni monitoringowych wahała się w granicach 1-11 cm, 1-12 cm i 1-15 cm, odpowiednio dla wysokości 500-750, 750-1000 oraz 1000-1250 m n.p.m. Większą miąższość poziomów ściółki stwierdzono pod drzewostanami świerkowymi, a mniejszą – pod drzewostanami liściastymi (występującymi nielicznie w lasach regla dolnego) oraz na odsłoniętych obszarach zdegradowanych z dominującą roślinnością trawiasto-krzewinkową, gdzie prowadzi się obecnie prace odnowieniowe.

Najwyższą zawartość węgla organicznego w badanych glebach stwierdzono w poziomie ściółki. W poziomie tym zaobserwowano również trend wzrostu zawartości węgla wraz z wysokością nad poziomem morza. W warstwach głębszych: 0-10 cm i 10-20 cm zawartość węgla organicznego była znacznie niższa niż w poziomie ściółki, ale nadal stosunkowo wysoka, co wskazuje na korzystne warunki gromadzenia się resztek roślinnych w glebach na obszarach górskich. Średnie zawartości węgla organicznego w warstwach 0-10 cm i 10-20 cm nie wykazują tak jednoznacznej tendencji wzrostu wraz z wysokością nad poziomem morza, jak to stwierdzono w przypadku poziomów ściółki. Wykazano jedynie statystycznie istotne zróżnicowanie średnich zawartości węgla organicznego w poziomach głębszych między najniższym, a najwyższym piętrzem wysokościowym. Najwyższe średnie zawartości węgla organicznego w glebach najwyższego piętra wysokościowego wiązać należy ze znacznym udziałem gleb organicznych w tej strefie.

W przeciwieństwie do zawartości węgla organicznego, wyrażonej w procentach (lub  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), zasoby węgla organicznego zgromadzone na jednostkowej

powierzchni (wyrażone w kg na m<sup>2</sup>) nie różnią się istotnie między poszczególnymi warstwami badanych gleb, choć obliczone wartości średnie zasobów węgla organicznego w warstwie 0-10 cm są wyższe (statystycznie nieistotnie) niż w poziomach ściółki, a także wyraźnie wyższe niż w warstwie 10-20 cm. Całkowite zasoby węgla organicznego zgromadzonego w powierzchniowych warstwach gleb do głębokości 20 cm (wraz z poziomem ściółki) wahały się w granicach od 3,64 do 58,2 kg·m<sup>-2</sup>. Jednakże stwierdzone maksymalne i minimalne wartości zasobów węgla w różnych strefach wysokościowych są bardzo zbliżone, z wyjątkiem maksymalnych zasobów węgla w najwyższej strefie (>1250 m n.p.m.), które są wyjątkowo wysokie. Chociaż można stwierdzić, że średnie pule węgla organicznego wzrastają wraz z wysokością, to jest to tendencja słaba i statystycznie nieistotna, mimo, że w wielu badaniach gleb obszarów górskich taka tendencja przedstawiana jest jako bardzo wyraźna. Brak statystycznego potwierdzenia wzrostu zasobów materii organicznej zgromadzonej w glebach wraz z wysokością – w badaniach opisanych w niniejszej pracy – należy wiązać z większym zróżnicowaniem właściwości gleb w obrębie jednej strefy niż pomiędzy strefami wysokościowymi.

**Zasoby przyswajalnych form składników pokarmowych w glebach leśnych w różnych strefach wysokościowych Karkonoskiego Parku Narodowego**

(Szopka K., Kabała C., Karczewska A., Bogacz A., Jezierski P. 2010. Pools of available nutrients in soils from different altitudinal forest zones located in a monitoring system of the Karkonosze Mountains National Park, Poland. *Pol. J. of Soil Science*, vol. 43/2, 173-188)

Ważnym czynnikiem, który wpływa na kondycję zdrowotną drzewostanów, jest zawartość w glebie składników pokarmowych w formach przyswajalnych dla roślin. Chociaż zasobność gleb leśnych w składniki pokarmowe jest naturalnie niska, to jednak duży deficyt przyswajalnych form fosforu, potasu i magnezu może być jednym z kluczowych czynników stresowych w niestabilnych ekosystemach leśnych, szczególnie na obszarach górskich.

W przeprowadzonych badaniach określono zasobność poziomów powierzchniowych gleb Karkonoszy w przyswajalne formy fosforu, potasu i magnezu w trzech strefach wysokościowych. Podczas gdy stężenie biodostępnych składników jest parametrem istotnym z punktu widzenia ekologii i fizjologii roślin, to jednak z perspektywy trwałości ekosystemów leśnych bardzo istotnym czynnikiem są nie tyle stężenia, co zasoby składników odżywczych w glebach. Dlatego w pracy przedstawiono zarówno zawartości (stężenia) przyswajalnych form składników odżywczych w glebach, jak również ich zasoby: zmierzone – do głębokości 20 cm oraz oszacowane – do głębokości 40 cm.

We wszystkich badanych poziomach glebowych oraz we wszystkich strefach wysokościowych stwierdzono bardzo duże zróżnicowanie zasobności w przyswajalny fosfor w poszczególnych warstwach gleb (ściółka, 0-10 cm i 10-20 cm), co potwierdzają wysokie wartości odchylenia standardowego, sięgającego w przypadku niektórych warstw 50%. Poziomy organiczne zawierają znacznie wyższe stężenia dostępnego fosforu niż poziomy mineralne. Średnie zawartości przyswajalnego fosforu w poziomach powierzchniowych gleb lasów regla dolnego (w jego części górnej i dolnej) są na dość zbliżonym poziomie (około 12 mg·kg<sup>-1</sup>),

co oznacza zasobność niedostateczną. W badaniach nie stwierdzono statystycznie istotnych różnic zawartości przyswajalnych form fosforu w poziomach ściółki w zależności od strefy wysokościowej, natomiast w poziomach mineralnych 0-10 cm i 10-20 cm stężenia dostępnego fosforu były znacznie wyższe w glebach lasów regla górnego niż dolnego.

Mimo wysokiej koncentracji fosforu przyswajalnego w poziomach ściółki, jego zasoby są znacznie wyższe w poziomach mineralnych (0-10 cm i 10-20 cm), aniżeli w próchnicy nadkładowej. Najwyższe zasoby przyswajalnego fosforu stwierdzono w glebach pod lasami regla górnego, które jednocześnie charakteryzują się najniższymi wartościami pH. Niskie zasoby przyswajalnego fosforu w glebach regla dolnego (średnio na poziomie 1,16 i 1,48 g·m<sup>-2</sup>, dla wysokości odpowiednio: 750-1000 i 500-750 m n.p.m.) mogą być niewystarczające dla optymalnego wzrostu roślin, szczególnie w kontekście przebudowy mniej wymagających drzewostanów iglastych na mieszane lub liściaste.

W badanych glebach stwierdzono względnie wysoką koncentrację przyswajalnego potasu, szczególnie w poziomach ściółki. Nie stwierdzono statystycznie istotnych różnic w zawartości przyswajalnego potasu w poziomie ściółki między poszczególnymi piętrami wysokościowymi, natomiast w warstwach mineralnych 0-10 i 10-20 cm zawartość przyswajalnego potasu zmniejszała się wraz z wysokością nad poziomem morza. Zasoby potasu w poszczególnych poziomach gleb wykazują takie same tendencje, jakie opisano dla fosforu – najwyższe zasoby stwierdzono w warstwie 0-10 cm, mimo, że koncentracje przyswajalnych form potasu były najwyższe w warstwie ściółki, co potwierdza, że głównym rezerwuarem potasu w badanych glebach jest warstwa 0-10 cm a nie ściółka.

Dla zawartości przyswajalnego magnezu w poszczególnych warstwach badanych gleb stwierdzono takie same tendencje jak w przypadku fosforu. Statystycznie istotne były jedynie różnice w zawartości przyswajalnego magnezu między poszczególnymi warstwami gleb: poziomem ściółki oraz warstwami 0-10 cm i 10-20 cm. Jedynie dla poziomu 0-10 cm stwierdzono statystycznie istotną różnicę zawartości przyswajalnego magnezu w glebach w poszczególnych strefach wysokościowych. Średnie zasoby przyswajalnego magnezu, obliczone dla poszczególnych stref wysokościowych, wahały się w granicach od 4,6 do 5,5 g·m<sup>-2</sup> a różnice pomiędzy strefami nie były statystycznie istotne.

Dla przyswajalnych form fosforu, potasu i magnezu stwierdzono istotną korelację między ich zawartością a ilością materii organicznej, szczególnie w warstwach 0-10 cm. Uzyskane wyniki mają znaczenie dla projektowania przebudowy drzewostanów, gdyż wskazują na rolę zwiększania zasobów materii organicznej w glebach dla zwiększania zasobności gleb w przyswajalne formy makroskładników, szczególnie fosforu, którego wyraźny deficyt występuje w glebach górskich Karkonoszy.

**Zawartość rtęci w poziomach powierzchniowych gleb górskich na przykładzie Karkonoszy**

(Szopka K., Karczewska A., Kabała C. 2011. Mercury accumulation in the surface layers of mountain soils: A case study from the Karkonosze Mountains, Poland. *Chemosphere* 83: 1507-1512)

Za jeden z najważniejszych czynników, wpływających negatywnie na ekosystemy Karkonoszy, obok kwaśnych deszczy, uważa się podwyższoną zawartość metali ciężkich w glebie. Dotyczy to zwłaszcza silnie toksycznych metali: rtęci oraz ołowiu. Ze względu na silną toksyczność rtęci, jej obecność w środowisku w znacznie większych ilościach oraz przemiany biogeochemiczne, jakim ulega, powinny być objęte kontrolą. Ważne źródło rtęci w glebach, obok skały macierzystej, stanowi depozycja z powietrza. Zasadniczo w glebach rtęć silnie wiąże się z fazą stałą, zwłaszcza z substancją organiczną, i pozostaje bardzo słabo mobilna, a przez to bardzo słabo przyswajalna dla roślin. Silne i trwałe wiązanie rtęci przez substancję organiczną sprawia, że zawartość tego pierwiastka w profilach gleb organicznych można traktować jako rodzaj archiwów dokumentujących zmiany lokalnego zanieczyszczenia powietrza rtęcią. Akumulacja rtęci w glebie stworzyć może ryzyko jej powolnego lub gwałtownego uwolnienia do roztworu glebowego i ekosystemów wodnych.

Celem niniejszych badań było określenie całkowitej zawartości oraz puli (zasobów) rtęci w powierzchniowych poziomach gleb, jak też próba określenia czynników, od których zawartość ta zależy. Porównano dwa obszary na terenie Karkonoszy: wschodni (w rejonie Karpacza) oraz zachodni (w rejonie Szklarskiej Poręby). Próbkę gleb pobrane zostały na wysokości od 760 do 1250 m n.p.m.

Zawartości Hg mieściły się w zakresie 0,04-0,972 mg·kg<sup>-1</sup> i w nielicznych tylko punktach przekraczały wartość 0,5 mg·kg<sup>-1</sup>, określoną jako standard jakości gleby dla obszarów chronionych, zgodnie z przepisami obowiązującymi w Polsce w latach 2002-2016 [Rozp. MŚ 2002]. W świetle regulacji obowiązujących obecnie [Rozp. MŚ 2016], za dopuszczalne i jednocześnie bezpieczne, zawartości rtęci w glebach obszarów chronionych uważa się 2, 4 lub 5 mg·kg<sup>-1</sup>, zależnie od właściwości gleby, a zatem w żadnym z punktów nie można mówić o nadmiernym zanieczyszczeniu gleb rtęcią. Stwierdzono jednak wyraźne wzbogacenie gleb w rtęć w wyżej położonych punktach w reglu górnym, a także lokalne wzbogacenie, na różnych wysokościach, w sąsiedztwie obiektów zagospodarowanych, o nasilonym wpływie antropogenicznym.

Badania wykazały, że poziomy próchnicy nadkładowej są najbardziej wzbogacone w ten pierwiastek, podczas gdy w próbkach pobranych z głębokości 10-20 cm zawartość Hg jest najniższa. Średnie zawartości Hg w poziomach: próchnicy nadkładowej oraz w warstwach: 0-10 cm i 10-20 cm wyniosły odpowiednio: 0,379, 0,282 i 0,140 mg·kg<sup>-1</sup>, a różnice między tymi wartościami są statystycznie istotne. Potwierdza to tendencję do akumulacji rtęci pochodzącej z depozycji atmosferycznej w powierzchniowych poziomach gleb, bogatych w substancję organiczną. Zawartości Hg w glebach wschodniej i zachodniej części Karkonoszy nie różnią się statystycznie istotnie między sobą. Dla warstwy 0-10 cm stwierdzono rosnącą zależność zawartości rtęci w glebie od wysokości nad poziomem morza, przy czym przeprowadzone badania nie pozwalają stwierdzić jednoznacznie, czy wynika to z faktu wyższego dopływu tego pierwiastka, w związku z większą roczną



sumą opadów, czy jest to efekt zwiększonej sorpcji i akumulacji Hg w glebach o wyższej zawartości substancji organicznej. Można przypuszczać, że względnie wysoka koncentracja Hg w glebach na wysokości powyżej 1000 m nad poziomem morza może mieć związek z długością czasu zalegania niskich chmur oraz mgieł, które sprzyjają absorpcji zanieczyszczeń z powietrza.

Określono również względną ilość rtęci zakumulowanej w glebie w odniesieniu do 1 g glebowej materii organicznej (OM), obliczoną jako stosunek Hg:OM, w poszczególnych poziomach badanych gleb. Na uwagę zasługują dwukrotnie wyższe wartości stosunku Hg:OM w warstwie 0-10 cm, w porównaniu z danymi literaturowymi, co należy wiązać z większą depozycją rtęci z atmosfery. Wzrost stosunku Hg:OM z głębokością tłumaczyć można transformacją materii organicznej (jej rozkładem i humifikacją) oraz wiązaniem rtęci przez inne, mineralne składniki gleby.

Pula rtęci zakumulowana do głębokości 20 cm (włącznie ze ściółką) wahała się w zakresie 0,8-84,8 mg·m<sup>-2</sup>. Zgromadzona pula rtęci w glebach najwyższej strefy wysokościowej była wyższa w rejonie wschodnim niż zachodnim, podobnie jak zasoby materii organicznej na analizowanych obszarach. Uzyskane wyniki wskazują, że głównymi czynnikami, od których zależy wielkość zgromadzonych zasobów rtęci w glebach górskich, są wielkość dopływającego ładunku Hg oraz zawartość w glebie materii organicznej.

#### **Przestrzenne zróżnicowanie zawartości ołowiu w poziomach powierzchniowych gleb leśnych Karkonoszy**

(Szopka K., Karczewska A., Jezierski P., Kabala C. 2013. Spatial distribution of lead in the surface layers of mountain forest soils, an example from Karkonosze National Park, Poland. *Geoderma* 192, 259-268)

Ołów należy do tych metali ciężkich, których zawartość w glebach wiąże się mocno z działalnością człowieka i dlatego pierwiastek ten jest uważany za wskaźnik antropopresji. Stężenia ołowiu pochodzenia antropogenicznego w powietrzu w drugiej połowie XX w. o kilka rzędów wielkości przekraczały stężenia naturalne, a znaczące ilości tego pierwiastka podlegały w powietrzu transportowi na duże odległości. Masywy górskie, stanowiące bariery orograficzne dla napływających mas powietrza, są szczególnie narażone na imisję zanieczyszczeń i ich intercepcję na powierzchni roślin. Wysokie stężenia toksycznych pierwiastków, w tym ołowiu, uznaje się za czynnik, który mógł przyczynić się do masowego wymierania drzewostanów świerkowych. Obecnie emisja ołowiu do powietrza uległa drastycznemu obniżeniu, jednak jego zawartość w glebach może nie ulegać wyraźnym zmianom przez następnych kilkaset lat, gdyż pierwiastek ten podlega w glebie bardzo silnej sorpcji.

Celem podjętych badań było dostarczenie informacji o zawartości (stężeniu) oraz zasobach ołowiu w glebach Karkonoszy w celu zidentyfikowania obszarów najbardziej zanieczyszczonych i oceny potencjalnego ryzyka ekologicznego spowodowanego przez obecność Pb w środowisku glebowym, jak również rozpoznanie głównych czynników wpływających na przestrzenne zróżnicowanie zawartości ołowiu w glebach.

Najwyższe koncentracje ołowiu stwierdzono w poziomach ściółki: w przedziale od 24 do 200 mg·kg<sup>-1</sup>, w większości punktów – powyżej 100 mg·kg<sup>-1</sup>.

Zawartość ołowiu w badanych glebach zmniejsza się wraz z głębokością, toteż najniższe średnie jego zawartości stwierdzono w warstwie 10-20 cm. Wysokie zawartości ołowiu, połączone z kwaśnym odczynem badanych gleb, mogą wskazywać na zwiększone ryzyko jego mobilizacji i wystąpienia efektów ekotoksyczności. Analiza map pozwala na zidentyfikowanie na terenie Karkonoszy obszarów o podwyższonej zawartości ołowiu. Są to przede wszystkim obszary przełęczy górskich ze stosunkowo łagodnymi stokami ułatwiającymi napływ mas powietrza, jednocześnie o długim zaleganiu warstw chmur oraz mgły, co ułatwia intercepcję zanieczyszczeń z powietrza. Dodatkowo są to obszary występowania gleb organicznych zasobnych w materię organiczną, co sprzyja akumulacji ołowiu. Należy jednak podkreślić, że właściwości gleb na tych obszarach wykazują bardzo wysoką lokalną zmienność, związaną z mikroreliefem oraz zróżnicowanym pokryciem powierzchni gładzi. Analiza statystyczna nie wykazała prostej zależności pomiędzy stężeniem ołowiu w glebie a wysokością n.p.m. w żadnej z warstw. Stwierdzono jedynie, że zawartości ołowiu w warstwie 0-10 cm gleb były wyższe w lasach regla górnego w porównaniu z lasami położonymi na niższych wysokościach, jednak takiej tendencji nie zaobserwowano ani dla poziomu ściółki, ani dla warstwy 10-20 cm. Wyższe stężenia ołowiu w warstwie 0-10 cm w porównaniu do poziomów ściółki mogą wynikać z rozkładu ściółki silnie zanieczyszczonej w minionych dekadach, i włączenia do warstwy 0-10 cm gleby produktów jej transformacji, podczas gdy ściółki „współczesne” zasilane są biomasa liści/igieł mających kontakt z mniej zanieczyszczonym powietrzem. Dodatkowo proces humifikacji sprzyja „zatężaniu” ołowiu związanego przez substancję organiczną.

Puła ołowiu zgromadzonego w powierzchniowych warstwach gleb – do głębokości 20 cm (wraz z poziomem ściółki) waha się w granicach od 0,16 do 26,6 g·m<sup>-2</sup> i może być uważana za wysoką w porównaniu do wartości podawanych dla innych obszarów górskich. Porównanie wyników z danymi literaturowymi jest jednak utrudnione ze względu na niejednolity sposób szacowania stosowany przez różnych autorów. W odróżnieniu od stężeń, zasoby (pule) ołowiu zakumulowanego w glebach do głębokości 20 cm zmniejszają się wraz z wysokością nad poziomem morza. Tendencję tę można tłumaczyć dodatkowym oddziaływaniem emisji ołowiu pochodzącego ze źródeł lokalnych.

#### **Analiza zawartości siarki siarczanowej w glebach górnoreglowych borów świerkowych na terenie Karkonoszy**

(Szopka K., Karczewska A., Kabała C., Kulczyk K. 2011. Siarka siarczanowa z glebach górnoreglowych borów świerkowych Karkonoskiego Parku Narodowego. Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych, z. 50, 61-70)

Zawartość siarki siarczanowej w glebach ekosystemów górskich może być traktowana jako wskaźnik antropopresji przyczyniający się – zwłaszcza w ekosystemach górskich – do zamierania drzewostanów. W drugiej połowie XX wieku znaczące źródło siarki siarczanowej w glebach stanowiła mokra i sucha depozycja z atmosfery – skutek przemysłowych emisji dwutlenku siarki oraz kwaśnych deszczy. Wprawdzie w ostatnich 30 latach wielkość emisji siarki do atmosfery w Europie i w Polsce uległa radykalnemu zmniejszeniu, to jednak

na obszarach górskich depozycja i akumulacja siarczanowych form siarki nadal stanowić może problem ekologiczny.

Zawartość siarki siarczanowej w poziomach powierzchniowych gleb pod borami regla górnego analizowano dla dwóch obszarów, położonych w centralnej części Karkonoskiego Parku Narodowego (w rejonie Jagniątkowa i Przełęczy Karkonoskiej), w nawiązaniu do najważniejszych właściwości gleb. Zawartość S-SO<sub>4</sub> w próbkach była silnie zróżnicowana i wahała się w szerokim przedziale od 20 do 3600 mg·kg<sup>-1</sup> (średnio 378 mg·kg<sup>-1</sup>).

Średnia zawartość S-SO<sub>4</sub> w poszczególnych warstwach gleb wynosiła odpowiednio: 641 mg·kg<sup>-1</sup> w poziomie ściółki, 386 mg·kg<sup>-1</sup> w warstwie 0-10 cm oraz 167 mg·kg<sup>-1</sup> w warstwie 10-20 cm. Największe koncentracje S-SO<sub>4</sub>, z maksymalną wartością wynoszącą 3600 mg·kg<sup>-1</sup>, stwierdzono w wierzchnich warstwach gleb organicznych w rejonie Przełęczy Karkonoskiej. Przyczyny tak wysokich stężeń siarki siarczanowej w tych glebach nie są jasne, lecz wydaje się, że mogą być takie same, jak w przypadku ołowiu i innych zanieczyszczeń, to jest związane z preferencyjnym przemieszczaniem oraz zatrzymywaniem się chmur zawierających kwaśne aerozole, oraz wydłużoną intercepcją na roślinności.

Przeprowadzone badania wykazały wyraźną, choć niepotwierdzoną statystycznie, zależność zawartości siarki siarczanowej i zawartości substancji organicznej w badanych glebach. Zasoby zakumulowanej siarki siarczanowej są większe w glebach organicznych (1,5-50,8 g·m<sup>-2</sup>, średnio ok. 16 g·m<sup>-2</sup>) niż w glebach mineralnych (0,8-21,3 g·m<sup>-2</sup>, średnio ok. 10 g·m<sup>-2</sup>). Brak statystycznie istotnej zależności zasobów (puli) siarki siarczanowej zgromadzonej w glebach od zasobów materii organicznej należy wiązać z labilnością siarki siarczanowej, która w glebach może łatwo podlegać zarówno procesom mobilizacji, jak i transformacji.

Należy zaznaczyć, że stosując kryteria wykorzystywane przez IUNG, należałoby badane gleby scharakteryzować jako bardzo silnie zanieczyszczone siarką siarczanową.

## II.6. Wnioski

- Właściwości poziomów powierzchniowych gleb Karkonoszy charakteryzują się ogromnym zróżnicowaniem przestrzennym nie tylko w skali pasma górskiego (między poszczególnymi strefami wysokościowymi), ale nawet w skali stosunkowo niedużej powierzchni monitoringowej, co jest związane m.in. ze skomplikowanym mikroreliefem, wpływającym na warunki akumulacji materii organicznej.
- Mimo, że zawartość węgla organicznego jest znacznie wyższa w poziomach ściółki (próchnicy nadkładowej) niż w warstwach mineralnych, to stwierdzono, że największe zasoby węgla są zgromadzone w warstwie 0-10 cm. Udział poszczególnych poziomów w kształtowaniu całkowitych zasobów węgla organicznego w glebach leśnych Karkonoszy wskazuje bardzo silne zróżnicowanie lokalne, co powoduje, że różnice zasobów pomiędzy strefami wysokościowymi nie są istotne statystycznie.
- Gleby górskie Karkonoszy są niedostatecznie zasobne w przyswajalny fosfor, natomiast zasobne w potas i magnez. Zasobność gleb w składniki pokarmowe, szczególnie w fosfor, zależy głównie od zawartości materii organicznej,

co wskazuje na jej szczególną rolę w utrzymaniu odpowiedniego poziomu troficznego gleb na etapie regeneracji lub odnawiania zdegradowanych ekosystemów. Zabiegi uprawowe związane z odnawianiem zdegradowanych drzewostanów górskich powinny zatem w pierwszej kolejności chronić zasoby glebowej materii organicznej.

- Zawartości oraz pule (zasoby) rtęci i ołowiu zakumulowanych w powierzchniowych poziomach gleb Karkonoszy są wyższe od podawanych dla innych obszarów górskich, co potwierdza silniejsze zanieczyszczenie tego pasma górskiego. Nie potwierdzono jednoznacznej zależności koncentracji tych pierwiastków w poszczególnych warstwach gleb od wysokości nad poziomem morza. Wykazano, że stężenia obu pierwiastków w warstwie 0-10 cm są szczególnie wysokie w wyższych partiach górskich, ale trend ten nie został jednoznacznie potwierdzony statystycznie. Specyficzne przestrzenne zróżnicowanie zawartości Hg i Pb w glebach górskich, którego nie można wytłumaczyć jedynie wpływem skały macierzystej i właściwościami gleb, zależy w znacznej mierze od warunków determinujących depozycję zanieczyszczeń z powietrza. Szczególne znaczenie ma zwłaszcza akumulacja zanieczyszczeń transgranicznych w rejonach rozległych przełęczy górskich, gdzie warunki topograficzne sprzyjają długiemu zatrzymaniu chmur i mgieł oraz intercepcji zanieczyszczeń atmosferycznych.
- Zawartość siarki siarczanowej stwierdzona w powierzchniowej warstwie gleb regla górnego Karkonoszy jest wyższa niż w innych pasmach górskich, co wobec dużej potencjalnej labilności siarki siarczanowej stwarza ryzyko destabilizacji ekosystemów leśnych.
- Przeprowadzone badania potwierdziły, że metoda poboru próbek glebowych, oparta na stałych przedziałach głębokości zamiast na wyodrębnionych poziomach genetycznych, gwarantuje porównywalność wyników badań w glebach znacznie różniących się typologicznie i występujących w zróżnicowanych warunkach terenowych. Jednocześnie wykazano, że wyniki badań prowadzonych w sztywnej, regularnej siatce przestrzennej – która wymusza opróbowanie gleb w różnych warunkach topograficznych i wilgotnościowych oraz pod drzewostanami w różnym wieku, stopniu degradacji i regeneracji – mogą znacznie różnić się od wyników badań transektowych, obejmujących wyselekcjonowane profile glebowe.
- Randomiczność lokalizacji powierzchni monitoringowych (punktów poboru próbek gleb) związana jest z ogromną lokalną zmiennością badanych parametrów, co przekłada się na niewielką istotność, lub brak statystycznej istotności, różnic właściwości gleb w relacji do takich czynników, jak wysokość nad poziomem morza lub rodzaj roślinności czy stopień degradacji drzewostanu. Wniosek ten wskazuje jednak, że istotne statystycznie trendy wysokościowo-klimatyczne, wykazywane często dla właściwości gleb na obszarach górskich, mogą być prawdziwe tylko dla wyselekcjonowanych warunków topograficznych lub wilgotnościowych, natomiast znoszą się wzajemnie przy całkowicie randomicznym poborze próbek glebowych.

## II.7. Bibliografia

1. Danielewicz W., Raj A., Zientarski J. 2002. Ekosystemy leśne Karkonoskiego Parku Narodowego, Karkonoski Park Narodowy, Jelenia Góra.
2. Danielewicz W., Raj A., Zientarski J. 2013. Lasy. W: Knapik R., Raj A. (red.), Przyroda Karkonoskiego Parku Narodowego, Karkonoski Park Narodowy, Jelenia Góra: 279-302.
3. Drozd J., Licznar M., Weber J., Licznar S. E., Jamroz E., Dradrach A., Mastalska-Cetera B., Zawerbny T. 1998. Degradacja gleb w niszczonej ekosystemach Karkonoszy i możliwości jej zapobiegania, Polskie Towarzystwo Substancji Humusowych, Wrocław.
4. Fabiszewski J., 1985. Szata roślinna. W: Karkonosze Polskie, Ossolineum, Wrocław, 191-236.
5. Gramsz R., Potocka J., Kociánová M., 2010. Essential climatic conditions in the Giant Mts compared with Northern Scandinavia along Andrya – Kiruna profile. *Opera Corcontica* 47: 29-54.
6. Kabała C., Bogacz A., Łabaz B., Szopka K., Waroszewski J. 2013. Różnorodność, dynamika i zagrożenia gleb. W: Knapik R., Raj A. (red.), Przyroda Karkonoskiego Parku Narodowego, Karkonoski Park Narodowy, Jelenia Góra: 91-126.
7. Kabata-Pendias A., Pendias H. 1999. Biogeochemia pierwiastków śladowych. Wyd. PWN, Warszawa, ss. 400.
8. Kaczor A., Brodowska M.S. 2008. Effect of sulphur dioxide and nitrogen oxides emission on soil acidification in Poland. *Ecolog. Chem. Eng. A.* 15 (8): 791-798.
9. Karczewska A., Szopka K., Bogacz A., Kabała C., Duszyńska D. 2007. Rozważania nad metodyką monitoringu gleb strefy leśnej Karkonoskiego Parku Narodowego (KPN) w świetle zróżnicowania właściwości tych gleb, *Opera Corcontica* 44/1: 95-105.
10. Kmiec G., Kacperczyk K., Zwoździak J., Zwoździak A. 1994. Ocena stężenia i rodzaju zanieczyszczeń w opadach atmosferycznych w rejonie Karkonoszy. W: Karkonoskie badania ekologiczne II konferencja, red. Z. Fischer, Oficyna Wydawnicza Instytut Ekologii PAN, Dziekanów Leśny, 77-96.
11. Kocjan H.: 1999. Preparatory measures for a forestation and reforestation. Wyd. AR, Poznań. 1999.
12. Malkiewicz M., Waroszewski J., Bojko O., Egli M., Kabała C. 2016. Holocene vegetation history and soil development reflected in the lake sediments of the Karkonosze Mountains (Poland). *The Holocene*, doi:10.1177/0959683615622546.
13. Prevost, M., 2004. Predicting soil properties from organic matter content following mechanical site preparation of forest soils. *Soil Science Society of America Journal* 68, 943-949.
14. Raj A. 2014. Przemiany krajobrazu leśnego Karkonoskiego Parku Narodowego w okresie ostatnich kilkudziesięciu lat. Karkonoski Park Narodowy, Jelenia Góra, ss. 100.
15. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 r. w sprawie standardów jakości gleby oraz standardów jakości ziemi. *Dz.U.* 2002 nr 165 poz. 1359.
16. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 września 2016 r. w sprawie sposobu prowadzenia oceny zanieczyszczenia powierzchni ziemi. *Dz.U.* 2016 poz. 1395.
17. Sienkiewicz R., Krzaczkowski P., Twarowski R. 2005. Zanieczyszczenie powietrza i opadów atmosferycznych w Karkonoszach. W: Karkonosze – przyroda nieożywiona i człowiek, red. Mierzejewski M. P., Wyd. Uniwersytetu Wrocławskiego, Wrocław, 437-452.
18. Skiba S., Drewnik M., Szmuc R. 1994. Metale ciężkie w glebach wybranych rejonów Karkonoszy. W: Karkonoskie badania ekologiczne II konferencja, red. Z. Fischer, Oficyna Wydawnicza Instytut Ekologii PAN, Dziekanów Leśny, 125-134.

19. Skiba S., Drewnik M., Szmuc R. 1995. Zawartość metali ciężkich w powierzchniowych poziomach gleb Karkonoszy, *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 418, 1, 353-359.
20. Sobik M., Błaś M., Migała K., Godek M., Nasiólkowski T. 2013. Klimat. W: Knapik R., Raj A. (red.), *Przyroda Karkonoskiego Parku Narodowego*. Karkonoski Park Narodowy, Jelenia Góra, 175-214.
21. Szopka K., Karczewska A., Kabała C., Bogacz A., Jeziński P. 2007. Zróżnicowanie zawartości ołowiu w glebach Karkonoskiego Parku Narodowego w rejonie Jagniątkowa, *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych* 31, 28-32.
22. Zwoździak J., Kmieć G., Zwoździak A., Kacperczyk K. 1995. Presja zanieczyszczeń przemysłowych w ostatnim wieloleciu a stan obecny. W: *Problemy ekologiczne wysokogórskiej części Karkonoszy*, red. Z. Fischer, Oficyna Wydawnicza Instytut Ekologii PAN, Dziekanów Leśny, 79-96.

### III. Omówienie pozostałych osiągnięć badawczo-naukowych

Poza pracami, które posłużyły do przygotowania osiągnięcia naukowego pt. „Czynniki determinujące właściwości i stan gleb górskich narażonych na zanieczyszczenia powietrza na przykładzie Karkonoszy”, moja aktywność badawcza skupiała się w pięciu obszarach tematycznych:

1. Geneza, właściwości i klasyfikacja gleb górskich.
2. Przestrzenne rozmieszczenie i elementy biogeochemii pierwiastków śladowych w glebach ekosystemów górskich.
3. Właściwości gleb poddanych antropopresji na obszarach miejskich i przemysłowych, ze szczególnym uwzględnieniem zawartości pierwiastków śladowych.
4. Rozpuszczalność metali i metaloidów w glebach zanieczyszczonych w kontekście ich remediacji.
5. Rekultywacja gleb i hałd odpadów przemysłowych na terenach górniczych.

#### 1. Geneza, właściwości i klasyfikacja gleb górskich

Prace dotyczące właściwości gleb górskich realizowane były w różnych pasmach Sudetów, a zwłaszcza w Karkonoszach i Górach Stołowych. Szereg prac prowadzono w Górach Stołowych w związku z utworzeniem w roku 1993 Parku Narodowego Gór Stołowych (PNGS). Na potrzeby wieloletniego Planu Ochrony Parku niezbędne było wykonanie inwentaryzacji zasobów glebowych i odpowiedniego opracowania kartograficznego oraz sporządzenie diagnozy dotyczącej dynamiki zmian właściwości gleb, którego podjął się zespół gleboznawców z Wrocławia pod kierunkiem prof. Szerszenia. Pasmem górskim, w którym skupiło się szereg prac badawczych, były Góry Stołowe w Sudetach Środkowych, w których w 1993 roku utworzony został Park Narodowy Gór Stołowych (PNGS) wymagający opracowania wieloletniego Planu Ochrony, na który złożyć się musiała również inwentaryzacja zasobów glebowych i diagnoza dynamiki ich zmian. Przeprowadzone prace kartograficzne wykazały, że pokrywa glebowa Gór Stołowych ma charakter skomplikowanego systemu, w którym sąsiadują ze sobą gleby wytworzone z różnych skał macierzystych, o odmiennej morfologii i właściwościach, tworząc mozaikę rozmaitych siedlisk [19, 20]<sup>2</sup>. Rzutuje to na różnorodność ekosystemów Gór Stołowych powodując, że jest to obszar unikalny na skalę kraju. Na obszarze PNGS wyróżniono 33 typy gleb. Najbardziej charakterystyczne dla tego obszaru są gleby bielcowe (Podzols) powstałe ze zwietrzelin piaskowców kredowych Skalniaka, Narożnika, Szczelińca. Gleby brunatne (Cambisols) wytworzone z kredowych margli występują w rejonie Rogowej Kopy, Ostrej Góry i Pasterki. Wśród gleb brunatnych (Cambisols) wyróżniają się też gleby wytworzone z granitów w rejonie Kudowy Zdrój oraz piaskowców permskich – w rejonie Radkowa. W najwyższych partiach wzniesień oraz na krawędziach i wychodniach skalnych występują gleby inicjalne (Leptosols). W dolinach potoków rozcinających wzniesienia Gór Stołowych występują wąskimi

<sup>2</sup> Liczby w nawiasach kwadratowych odnoszą się do numerów publikacji w wykazie badań i osiągnięć naukowych (załącznik 4, część A.2 oraz B.1 – B.3)

pasami mady rzeczne (Fluvisols) o dość zwięzłym uziarnieniu (heavy texture). Tworzą one żyzne siedliska leśne i łąkowe. Na uwagę zasługują również gleby torfowe (Histosols) występujące na Wielkim Torfowisku Batorowskim, na Niknącej Łące i w kilkunastu mniejszych torfowiskach rozsianych po Parku [20, 57]. Zróżnicowaniu typologicznemu gleb towarzyszy zmienność cech morfologicznych i właściwości fizykochemicznych. Wbrew oczekiwaniom związanym z charakterem terenu (obszar górzisty) gleby płytkie zajmują tylko około 10% powierzchni. Dominują gleby średnio-głębokie (41% powierzchni) i głębokie (48% powierzchni). Uziarnienie gleb PNGS jest zróżnicowane i ściśle związane z rodzajem skały macierzystej oraz stopniem jej zwietrzenia. Na terenie Parku stwierdzono występowanie 29 grup granulometrycznych. Zwietrzliny skał Gór Stołowych na ogół odznaczają się odczynem kwaśnym lub silnie kwaśnym. Jedynie gleby wytworzone z młodych zwietrzelin niektórych margli (np. na Rogowej Kopie) posiadają odczyn obojętny [57].

Podczas prac terenowych na obszarze Gór Stołowych stwierdzono dominację gleb bielcowych i bieliec (Podzols). W wielu przypadkach, zwłaszcza gleb niecałkowitych, zakwalifikowanie ich do określonych typów jedynie na podstawie cech morfologicznych budziło wątpliwości. Dlatego niezbędne było przeanalizowanie kryteriów fizykochemicznych weryfikujących istnienie poziomów diagnostycznych, w szczególności oznaczenie zawartości i form żelaza. Analiza całkowitej zawartości żelaza w glebie oraz jego form, w tym żelaza ekstrahowanego pirofosforanem sodu, stanowi istotne źródło informacji o procesach zachodzących w glebie. Przedmiotem badań były gleby wytworzone z piaskowców, z których część została zaklasyfikowana do gleb bielcowych (Podzols), a część – do brunatnych kwaśnych (Dystric Cambisols). Przeprowadzone badania wskazują jednak, że w przypadku gleb górskich z nieciągłościami litologicznymi, wskaźniki chemiczne, w tym zawartość wolnego żelaza i glinu również mogą okazać się mało użyteczne w rozstrzygnięciu przynależności systematycznej gleb [22].

W porównaniu z Górami Stołowymi, Karkonosze charakteryzują się znacznie mniejszym zróżnicowaniem rodzajów budujących je skał. O składzie chemicznym i podstawowych właściwościach gleb Karkonoszy decyduje dominacja skał granitowych, a na przestrzenną różnorodność pokrywy glebowej w największym stopniu wpływają czynniki morfologiczne i klimatyczne. Badania realizowane na potrzeby monitoringu gleb Karkonoskiego Parku Narodowego (KPN), a także liczne inne prace badawcze potwierdziły, że pokrywa glebowa na obszarze Karkonoszy jest w ogólnym zarysie zróżnicowana strefowo – w następstwie pasowego występowania zjawisk i form morfologicznych oraz piętrowości klimatyczno-roślinnej, rozwiniętej dzięki znacznej wysokości bezwzględnej. Choć gleby Karkonoszy są zbudowane z lokalnego materiału zwietrzelinowego, to tylko niewielki odsetek powierzchni zajmują właściwe gleby wietrzeniowe, a więc uformowane ze zwietrzliny pozostającej w miejscu powstania, gdyż stoki większości wzniesień pokrywają zwietrzliny przemieszczone, głównie w okresie plejstoceniowym. Wbrew potocznym przekonaniom, gleby płytkie, czyli z litą skałą zalegającą nie głębiej niż 50 cm pod powierzchnią terenu nie występują powszechnie w Karkonoszach. W wyższych partiach gór dominują gleby średniogłębokie i głębokie, natomiast w niższych partiach gór i u ich podnóży zdecydowanie przeważają gleby bardzo głębokie,



o miąższości profilu przekraczającej 150 cm. Ocenę głębokości profilu często utrudnia silna szkieletowość gleby, czyli wysoka zawartość odłamków skalnych. Skład granulometryczny gleb nawiązuje do rodzaju skały macierzystej. W obszarze występowania metamorficznych łupków i gnejsów dominują gliny piaszczyste o wysokiej zawartości frakcji pyłowej (na ogół ponad 30-40%), na obszarze występowania granitów przeważają gleby o uziarnieniu glin piaszczystych, o mniejszej zawartości frakcji pyłowej (przeważnie 20-30%), o grubszym uziarnieniu frakcji piaskowej oraz o wysokiej zawartości drobnego szkieletu (frakcja 2-5 mm). Gleby Karkonoszy odznaczają się kwaśnym i silnie kwaśnym odczynem, który niekorzystnie rzutuje na przebieg procesów biochemicznych oraz ogólną żyzność tych gleb [16]. Obecna przestrzenna struktura pokrywy glebowej jest odzwierciedleniem piętrowości klimatu i roślinności, zmieniającej się przez cały okres holoceni. Najważniejszymi cechami gleb Karkonoszy są zatem: ich zbielicowanie, odgórne oglejenie oraz wzbogacenie w materię organiczną, narastające wraz z wysokością. Dzięki unikalnemu złożeniu warunków środowiskowych, na obszarze Karkonoszy występuje przynajmniej 15 typów gleb: od gleb inicjalnych skalistych (Lithic Leptosols), rumoszowych (Hyperskeletal Leptosols), przez rankery (Leptosols), gleby brunatne (Cambisols), bielice (Podzols), gleby glejowe (Gleysols), torfowe (Fibric/Hemic Histosols), gleby organiczno-ściółkowe (Folic Histosols), mady (Fluvisols), aż po gleby antropogeniczne (ekranosole, gleby urbiziemne – Technosols). Postępujące zmiany klimatyczne, przede wszystkim stopniowe ocieplenie, skorelowane z przeobrażeniami szaty roślinnej, mogą znacząco wpłynąć na pokrywę glebową Karkonoszy. Wzrost temperatury i zmiana klimatycznego bilansu wodnego spowodują przesuszenie torfowisk oraz płytkich pokryw torfiastych i zwiększy tempo mineralizacji materii organicznej. Oznaczać to będzie stopniowy zanik gleb torfowo-glejowych (Histic Gleysols) oraz stagnobielic torfowych (Histic Podzols) poprzez ich ewolucję w kierunku gleb murszowych (Umbric Gleysols), a następnie gleb całkowicie mineralnych [16, 41]. Klęska ekologiczna lat osiemdziesiątych XX wieku zwróciła też uwagę na problem zanieczyszczenia środowiska Karkonoszy. W badaniach wykazano zwiększoną ekspozycję masywu górskiego na pierwiastki śladowe, m.in. ołów i rtęć i potwierdzono zróżnicowany stopień zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi, głównie poziomów powierzchniowych. Nie wykazano jednoznacznie, by emisje przemysłowe zwiększyły zakwaszenie gleb Karkonoszy. Należy stwierdzić, że dominacja jednogatunkowych drzewostanów świerkowych najmocniej i długofalowo przyczynia się do zubożenia gleb, co przejawia się w powszechności ich zbielicowania [15].

Ważnym aspektem badań właściwości gleb górskich, związanym z masowym zamieraniem drzewostanów w Sudetach w ostatnich dwóch dekadach XX w., była analiza odczynu gleb oraz depozycji i akumulacji siarki. Zawartość siarki w glebach Karkonoszy stanowi jeden z głównych problemów badawczych składających się na osiągnięcie habilitacyjne. W glebach bielicowych i brunatnych kwaśnych wytworzonych z piaskowców górnokredowych na terenie PNGS również określono zawartość siarki. We wszystkich badanych glebach stwierdzono wyższą koncentrację siarki w poziomach organicznych niż mineralnych. Zawartość siarki w glebach kształtowana jest przez ilość substancji organicznej, co potwierdza wysoki współczynnik korelacji Pearsona. Nie stwierdzono trendu wysokościowego zróżnicowania zawartości siarki. W leśnych glebach górskich trudnym

do stwierdzenia jest fakt, czy kumulacja siarki w poziomach organicznych jest spowodowana wyłącznie naturalną bioakumulacją, czy zanieczyszczeniem pochodzenia antropogenicznego [26].

Do ważnych właściwości gleb, determinujących ich żyzność, należy rodzaj oraz skład próchnicy glebowej. W okresie zamierania drzewostanów na terenie Karkonoszy skład frakcyjny związków próchnicznych w glebach tego rejonu był przedmiotem wielu badań, natomiast w ostatnich latach ukazuje się niewiele prac dotyczących relacji między czynnikami środowiskowymi w ekosystemach Karkonoszy, a składem związków próchnicznych w glebach. Celem podjętych badań była ocena właściwości próchnicy w glebach pasma Karkonoszy zróżnicowanych pod względem położenia nad poziom morza i występującej szaty roślinnej. Badaniem objęto profile glebowe zlokalizowane w zachodniej części Karkonoszy, na różnych wysokościach oraz w zróżnicowanych warunkach siedliskowych. Udział poszczególnych frakcji związków próchnicznych, wyizolowanych zgodnie ze zmodyfikowaną metodą Tiurina analizowany był w poziomach próchnicy nadkładowej oraz w poziomach mineralnych. We wszystkich próbkach znaczny udział stanowiła frakcja Ia reprezentująca niskocząsteczkowe połączenia organiczne o największej rozpuszczalności i mobilności. Stwierdzono, że udział frakcji I (wolnej), zmniejsza się w głąb profili, ale w glebach podlegających bielicowaniu wzrasta w poziomach Bh. Skład dopływającej biomasy wpływa na proporcję kwasów huminowych i fulwowych frakcji I w poziomach ektopróchnicy. Proporcja  $C_{kh}/C_{kf}$  przyjmuje najwyższe wartości pod monokulturowym borem świerkowym. Z przeprowadzonych badań wynika, że głównymi czynnikami wpływającymi na skład frakcyjny związków próchnicznych w glebach Karkonoszy są charakter zbiorowiska roślinnego oraz kierunek procesów glebotwórczych [43].

## 2. Przestrzenne rozmieszczenie i elementy biogeochemii pierwiastków śladowych w glebach ekosystemów górskich

Obszary górskie są szczególnie narażone na zanieczyszczenia chemiczne, co często wynika z orograficznego zatrzymania mas zanieczyszczonego powietrza i wzmożonej intercepcji zanieczyszczeń. Jednym z parametrów opisujących stopień antropogenicznego przekształcenia środowiska jest całkowita zawartość pierwiastków śladowych w glebach i roślinach oraz ich profilowe rozmieszczenie. Prace poświęcone tej problematyce realizowano w różnych pasmach górskich Sudetów.

Góry Stołowe są usytuowane stosunkowo daleko od większych przemysłowych źródeł emisji pyłowych i gazowych, będących jedną z przyczyn wzrostu zawartości pierwiastków śladowych w glebach. W badanych glebach leśnych bielicowych (Podzols) i brunatnych kwaśnych (Dystric Cambisols) wytworzonych z piaskowców na terenie Gór Stołowych przeanalizowano całkowitą zawartość Pb, Cu, Zn, Cd i Ni oraz ich rozmieszczenie w profilach badanych gleb. Stwierdzono silne nagromadzenie ołowiu, miedzi i cynku w poziomach ściółki w stosunku do warstw mineralnych. Nikiel nie akumuluje się w poziomach wierzchnich, lecz jest raczej gromadzony w dolnej części profilu glebowego. Trudno jest jednoznacznie stwierdzić, czy w badanych glebach podwyższona zawartość

niektórych pierwiastków śladowych związana jest tylko z biologiczną akumulacją, czy z wpływami antropogenicznymi, jednak profilowe rozmieszczenie większości analizowanych pierwiastków zależy głównie od kierunku procesów glebowych. W badanych glebach na obszarze PNGS nie stwierdzono degradacji chemicznej w postaci nadmiernej kumulacji metali ciężkich, których zawartości w poziomach mineralnych są zbliżone do tzw. tła geochemicznego [25, 29].

Badaniami objęto także gleby leśne Karkonoszy oraz pasm górskich sąsiadujących z Karkonoszami: Gór Izerskich i Rudaw Janowickich [23]. W pracach zaprezentowano wyniki zawartości ołowiu, miedzi, cynku i niklu w poziomach genetycznych gleb brunatnych kwaśnych (Dystric Cambisols) wytworzonych z granitów zlokalizowanych pod lasami regla dolnego w Karkonoszach oraz gleb wytworzonych z granitów i gnejsów biotytowych Gór Izerskich i Rudaw Janowickich. W glebach leśnych wytworzonych z granitów na terenie Karkonoszy stwierdzono podwyższoną zawartość miedzi w poziomach organicznych, jednak nie stwierdzono jej nadmiernej kumulacji. Profilowe rozmieszczenie miedzi zależy głównie od kierunku procesów glebowych. Zależności takiej nie stwierdzono dla niklu [30]. Nie stwierdzono wyraźnego różnicowania zawartości cynku i miedzi pomiędzy glebami Gór Izerskich i Rudaw Janowickich, natomiast w przypadku ołowiu w glebach Gór Izerskich stwierdzono wyższe zawartości niż w glebach Rudaw Janowickich. Zauważono ponadto wyraźną tendencję do kumulowania się ołowiu w powierzchniowych poziomach organicznych. Gleby Gór Izerskich i Rudaw Janowickich wykazują podobne, niewysokie zawartości miedzi i cynku jak podawane dla Karkonoszy, natomiast maksymalne ilości ołowiu podawane dla Karkonoszy są znacznie wyższe niż w otaczających pasmach górskich [23, 30].

Wielkoobszarowe zamieranie lasów świerkowych, które miało miejsce w latach 80. XX wieku w Sudetach, w tym także na terenie Karkonoskiego Parku Narodowego związane było z oddziaływaniem szkodliwych substancji, jak też z sytuacją stresową wynikającą z synergicznego wpływu skażeń przemysłowych i innych czynników szkodliwych, co doprowadziło do podwyższonej podatności drzewostanów na ataki szkodliwych owadów i choroby. Na terenie Karkonoszy, najczęściej na obszarach, gdzie szczególnie widoczny był zły stan drzewostanów, prowadzono badania nad zawartością pierwiastków śladowych w glebach [7, 10, 34, 37, 39, 59]. Ekranizująca rola systemów górskich może być przyczyną znaczniejszej akumulacji metali w tych glebach i występowania stężeń tych pierwiastków znacznie przekraczających stężenia naturalne. Najważniejszym naturalnym źródłem metali ciężkich w glebach jest skała macierzysta. Granit budujący masyw Karkonoszy jest skałą magmową kwaśną, zawierającą niewielkie ilości większości metali, ale stosunkowo dużą koncentrację ołowiu. Celem badań było określenie różnicowania zawartości wybranych pierwiastków śladowych (Pb, Zn, Cu, Cd i Hg) w poziomach ściółki i poziomach mineralnych (0-10 cm i 10-20 cm) gleb leśnych Karkonoskiego Parku Narodowego, ze szczególnym uwzględnieniem różnicowania wysokości n.p.m. oraz rodzaju i wieku zbiorowisk leśnych występujących na tym terenie. Znaczny udział w strukturze wiekowej stanowią drzewostany młodsze, których wiek jest związany z odnowieniami zdegradowanych ekosystemów leśnych. Materiał glebowy pobrany został w wybranych punktach stałego monitoringu ekosystemów leśnych Karkonoskiego Parku Narodowego, obejmującego 630 punktów położonych w strefie lasu i 230

punktów położonych w strefie subalpejskiej. Do właściwej interpretacji wyników niezbędne było rozpoznanie lokalnej zmienności zawartości pierwiastków śladowych w glebach. Pokazano, że próbki pobrane w obrębie jednej powierzchni monitoringowej wykazują duże zróżnicowanie właściwości, w tym zawartości metali, zwłaszcza ołowiu. Zróżnicowanie to dotyczy zarówno poziomów mineralnych, jak organicznych [7, 34, 59].

W badanych glebach stwierdzono nagromadzenie ołowiu, miedzi i cynku w poziomach ściółki w porównaniu do poziomów mineralnych, jednak zawartości cynku i miedzi są na tyle niskie, że nie stwarzają ryzyka środowiskowego. Wysokie zawartości ołowiu w ściółkach są dowodem na długoletnią depozycję atmosferyczną [10].

Badane gleby Karkonoskiego Parku Narodowego w rejonie Karpacza zasadniczo nie są ponadnormatywnie zanieczyszczone kadmem. Poziomy próchnicy nadkładowej są znacznie bogatsze w kadm w porównaniu do głębszych poziomów organicznych lub mineralnych. Wysokość n.p.m. w istotny sposób wpływa na zawartość kadmu w glebie i zawartość ta rośnie wraz z wysokością n.p.m., głównie w poziomach próchnicy nadkładowej [39]. Gleby w rejonie Szklarskiej Poręby wykazują wzbogacenie w rtęć poziomów próchnicy nadkładowej oraz poziomów organicznych 0-10 cm w porównaniu z głębszymi poziomami mineralnymi. Istotna korelacja pomiędzy zawartością rtęci a ilością substancji organicznej potwierdza silne wiązanie tego pierwiastka w poziomach organicznych. W badanych glebach Karkonoskiego Parku Narodowego nie występuje problem znacznego zanieczyszczenia rtęcią [37].

### **3. Właściwości gleb poddanych antropopresji na obszarach miejskich i przemysłowych, ze szczególnym uwzględnieniem zawartości pierwiastków śladowych**

Badania dotyczące zanieczyszczenia gleb pierwiastkami stwarzającymi ryzyko środowiskowe, a w szczególności metalami ciężkimi, metaloidami: arsenem i antymonem oraz fluorem, prowadzono na obszarach miejskich, poddanych działaniu różnych czynników antropogenicznych, w sąsiedztwie zakładów przemysłowych, takich jak huty metali czy huta szkła, a także na terenach objętych oddziaływaniem współczesnego oraz dawnego górnictwa i przetwórstwa rud.

Badania przeprowadzone na terenach przyległych do Huty Szkła „Julia” w Piechowicach, oraz w odległości do 1 km od tej Huty, miały na celu określenie zawartości fluoru i niektórych metali ciężkich w glebach (ornych, leśnych i darniowych), na tle właściwości fizycznych i chemicznych gleb. Huta Szkła „Julia” zlokalizowana jest w centrum Piechowic, w zachodniej części Sudetów, w Kotlinie Jeleniogórskiej. Otrzymane wyniki wskazują, że zawartość fluoru w badanych glebach mieści się w granicach średnich i nie stwierdzono zanieczyszczenia gleb tym pierwiastkiem. Również zawartość metali ciężkich w glebach pozostawała w zakresie wartości uznanych za dopuszczalne dla tych metali. Stwierdzono także, że zawartość analizowanych pierwiastków śladowych w próbkach roślin pobranych wokół badanego obiektu utrzymywała się w normie, jedynie w ziemniakach stwierdzono podwyższoną zawartość Pb [24].

Badania dotyczące wzbogacenia gleb w metale ciężkie i metaloidy prowadzono na obszarach dawnego górnictwa i przetwórstwa rud metali w Sudetach, a w szczególności w rejonie Żeleźniaka w Górach Kaczawskich, Złotego Stoku w Górach Złoty, Miedzianki i Czarnowa w Rudawach Janowickich, Szklar na Przedgórzu Sudeckim oraz w kilku innych ośrodkach górniczych. Badania te wykazały, że nie tylko materiał hałd odpadów górniczych, ale także gleby otaczające te hałdy, nie noszące znamion geomorfologicznego przekształcenia, zawierają metale ciężkie mieszanego – naturalnego i antropogenicznego – pochodzenia, w koncentracjach przekraczających standardy jakości gleby i ziemi obowiązujące w Polsce do 2016 roku [33]. W większości przypadków metale występują w formach bardzo trudno rozpuszczalnych. Arsen, jako pierwiastek półmetaliczny, zachowuje się w glebach inaczej niż inne metale ciężkie. Badania realizowane w rejonach Żeleźniaka, Czarnowa, a zwłaszcza Złotego Stoku wykazały, że tworzy on w glebach głównie połączenia z uwodnionymi tlenkami żelaza, przez które jest silnie sorbowany wymiennie i specyficznym, przez co pozostaje w środowisku glebowym mało ruchliwy [13, 33]. Wykazano jednak, że w warunkach anaerobiozy rozpuszczalność arsenu w glebach może wzrastać. Pobranie tego pierwiastka przez rośliny, zarówno uprawne, jak i dziko rosnące, jest niewielkie, i nawet w rejonach zanieczyszczonych nie stanowi zagrożenia dla łańcucha troficznego [13].

Badania prowadzone w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym dotyczyły zarówno gleb sąsiadujących z hutami miedzi Legnica i Głogów, jak i podlegającymi wpływowi największego w Europie zbiornika odpadów po flotacji rud. Badano także właściwości samych odpadów poflotacyjnych.

Analiza profilowego rozmieszczenia metali: miedzi, ołowiu, cynku i kadmu w glebach w rejonie hut miedzi oraz wyniki badań prowadzonych przez ponad 20 lat w stałych punktach monitoringowych wskazywały, że w glebach średnich i ciężkich, w warunkach obojętnego odczynu, metale, a w szczególności miedź i ołów, nie przemieszczają się w głąb profilu. W przypadku gleb lekkich i bardzo lekkich badania wskazywały na możliwość przemieszczania się metali, w tym miedzi i ołowiu, w głąb profilu glebowego [21]. W ramach podjętych badań analizowano również wpływ różnych gatunków drzew: brzozy brodawkowatej (*Betula pendula* ROTH), topoli białej (*Populus alba* L.) oraz robinii akacjowej (*Robinia pseudoacacia* L.) na środowisko glebowe w strefie ochronnej Huty Miedzi „Głogów” oraz dynamikę pierwiastków śladowych w okresie 8 lat. Na badanym obszarze wytypowano sześć reprezentatywnych punktów, zlokalizowanych w różnych kierunkach i odległościach od huty, różniących się dominującym drzewostanem. Wierzchnie poziomy gleb w tych punktach, zwłaszcza położonych najbliżej huty, są w znacznym stopniu zanieczyszczone miedzią. Analizując linię trendu zawartości miedzi w ciągu ostatnich 8 lat można stwierdzić, że jej stężenie w glebach nie wzrasta i kształtuje się na podobnym poziomie. Nie oznacza to jednak poprawy stanu środowiska glebowego, gdyż zakumulowane ilości miedzi będą stanowiły zagrożenie jeszcze przez długi okres czasu. Badane gatunki drzew, mimo bardzo wysokiej koncentracji miedzi i ołowiu w glebach, przyjęły się na tym terenie bardzo dobrze. W ostatnich latach zauważa się znaczną ekspansję gatunkową brzozy, natomiast topola biała wykazuje małą odporność na choroby grzybowe i szkodniki [27].

Badaniami objęto również osady poflotacyjne zgromadzone w 3 zbiornikach: Gilów (rejon Lubina), powierzchnia zbiornika 600 ha, częściowo zrekułtywowany, Lena I (rejon Złotoryi), powierzchnia zbiornika 41 ha, zrekułtywowany, oraz Iwiny I (rejon Bolesławca), powierzchnia zbiornika 129 ha, rekułtywacja biologiczna nieudana. Celem podjętych badań było określenie całkowitych zawartości metali ciężkich oraz potencjalnej i aktualnej ich rozpuszczalności w badanych osadach poflotacyjnych, co może wyjaśnić częściowe niepowodzenia w dotychczasowej rekułtywacji oraz planowaniu dalszych zabiegów. Osady poflotacyjne górnictwa miedzi zawierają znaczne ilości Cu, Pb w formach potencjalnie rozpuszczalnych, ale rzeczywista rozpuszczalność i bioprzyswajalność tych metali jest bardzo niska. W obecności jonów amonowych może następować mobilizacja miedzi z osadów w formie kompleksów amina-miedziowych. Fakt ten należy uwzględnić przy projektowaniu zabiegów rekułtywacyjnych, a zwłaszcza nawożenia azotem [58].

Badania dotyczące zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi na obszarach miejskich prowadzono w szczególności na terenach zieleni miejskiej, stanowiących ważny element fizjonomii miast, a także w obrębie ogrodów działkowych [8, 28, 44, 45, 51]. Parki jako enklawy zieleni w miastach pełnią ważne funkcje społeczne, kulturowe i ekologiczne. Badaniami objęto gleby darniowe trzech parków Wrocławia: Parku Szczytnickiego, Zachodniego oraz Południowego zlokalizowanych w różnych częściach miasta. W każdym z trzech parków wyznaczono 4 obszary zadarnione, każdy o powierzchni ok. 100 m<sup>2</sup>, z których pobrano reprezentatywne próbki gleb z dwóch głębokości: 0-5 cm oraz 5-15 cm. Oznaczono podstawowe właściwości fizykochemiczne oraz całkowitą zawartość cynku, miedzi, ołowiu i kadmu. Zawartość metali w badanych glebach charakteryzuje się dużym zróżnicowaniem zarówno między parkami, jak również między punktami w obrębie jednego Parku [45]. Najwyższe średnie zawartości analizowanych pierwiastków śladowych stwierdzono w glebach trawników Parku Zachodniego, przy czym najwyższe zawartości cynku stwierdzono w poziomach powierzchniowych 0-5 cm w tym parku, zaś ołowiu w poziomach głębszych 5-15 cm. Zależności te poddano dyskusji. Najniższe zawartości analizowanych pierwiastków śladowych stwierdzono w Parku Południowym. W nielicznych punktach stwierdzono przekroczenie standardów jakości gleb dla ołowiu obowiązujące w Polsce do 2016 roku [45]. Zawartość kadmu w glebach parków Wrocławia na większości badanych obszarów określono jako nieznacznie podwyższoną, ale lokalnie występują trawniki z glebami silnie wzbogaconymi w kadm, co zapewne należy wiązać z antropogenicznym pochodzeniem skał macierzystych gleb. Nie stwierdzono zależności zawartości kadmu od uziarnienia gleb. Zależność między zawartością kadmu i odczynem gleb wskazuje na możliwość wymywania tego pierwiastka z gleb, zwłaszcza kwaśnych, ale takie przypuszczenie należałoby potwierdzić w dalszych badaniach [51].

Tereny zieleni na obszarach miast, obok parków obejmują także trawniki, które – zgodnie z zasadami tworzenia kompozycji przestrzennej miast, powinny zajmować od 50 do 70% powierzchni terenów zieleni. Oddziaływanie czynników siedliskowych i antropogenicznych bardzo istotnie wpływa na charakter ekosystemów trawiastych. Badania właściwości gleb, a zwłaszcza zanieczyszczenia metalami ciężkimi, przeprowadzono na wybranych trawnikach osiedlowych Wrocławia. Do badań wytypowano trawniki osiedli: Śródmieścia, Krzyków i Fabrycznej. W badanych glebach nie stwierdzono zanieczyszczenia miedzią.

Zawartość tego pierwiastka w poziomach powierzchniowych nie przekraczała standardów jakości gleb dla obszarów zurbanizowanych. Największą średnią zawartością charakteryzują się gleby trawników najstarszej, historycznej części Wrocławia. Całkowite zawartości miedzi w badanych glebach determinowane są głównie uziarnieniem gleb. W badanych glebach nie stwierdzono korelacji między zawartością miedzi a zawartością węgla organicznego, co jest zjawiskiem nietypowym, które należy wiązać z antropogenicznym pochodzeniem miedzi w analizowanych glebach [44].

Szczególne funkcje w dużych miastach pełnią ogrody działkowe, wykorzystywane nie tylko do celów rekreacyjnych, ale też do produkcji warzyw i owoców. W aglomeracjach miejsko-przemysłowych coraz większym problemem staje się stan środowiska ogródków działkowych. Wyniki licznych badań wskazują, że pyły i aerozole emitowane przez lokalne zakłady przemysłowe, kotłownie, transport samochodowy mogą doprowadzić do nadmiernego nagromadzenia pierwiastków metalicznych w glebach ogrodowych. W badaniach przeanalizowano zawartość Cu, Pb i Zn w 180 ogródkach działkowych zlokalizowanych w różnych częściach miasta Wrocławia. W badanych poziomach powierzchniowych gleb zawartość pierwiastków śladowych jest zróżnicowana i zależy od lokalnego przemysłowego źródła zanieczyszczeń, ale również od zawartości materii organicznej, odczynu gleb oraz zawartości przyswajalnych makroskładników, co potwierdza zależność pomiędzy zawartością pierwiastków śladowych a intensywnością nawożenia organicznego i mineralnego. Porównując zawartość pierwiastków śladowych w glebach ogródków działkowych w centrum miasta i w ogrodach zakładanych na dawnych terenach rolniczych stwierdzono, że w glebach w centrum miasta zawartość pierwiastków jest znacznie wyższa, a 35% gleb ogródków działkowych Wrocławia jest nadmiernie zanieczyszczonych i gleby te nie powinny być wykorzystywane do produkcji warzyw [8].

W 1997 roku w Legnicy podczas powodzi stulecia uległa zalaniu znaczna część ogródków działkowych. Woda stagnowała przez 3 tygodnie, a poziom wód powodziowych sięgał do wysokości 50 cm powyżej powierzchni terenu, co doprowadziło do wytworzenia się w glebach warunków beztlenowych i w konsekwencji – zniszczenia upraw i obumierania drzew. Badania właściwości gleb na terenach objętych powodzią wskazują na wyraźne wzbogacenie poziomów powierzchniowych gleb niektórych działek w metale, szczególnie miedź, co może być spowodowane zarówno wodami powodziowymi, jak również emisją huty miedzi „Legnica”, stosowaniem nawozów bogatych w metale ciężkie oraz zakładaniem ogródków na glebach już zanieczyszczonych [28].

Problem zanieczyszczenia gleb urbanoziemnych stanowi w ostatnich latach przedmiot licznych prac badawczych. Większość doniesień wskazuje na duże lokalne zróżnicowanie zanieczyszczenia gleb urbanoziemnych, co przypisywać należy różnym przyczynom, m.in. wpływowi emisji motoryzacyjnych, stosowaniu farb i tynków zawierających metale ciężkie, emisjom przemysłowym, a wreszcie sytuowaniu zabudowy na terenach poprzemysłowych i wykorzystywaniu różnych materiałów i odpadów budowlanych do niwelacji i zagospodarowania terenu.

Badaniami objęto północną, przemysłową dzielnicę Wrocławia – Różankę oraz obszary położone w bezpośrednim sąsiedztwie czynnych zakładów przemysłowych: Zakładów Chemicznych „Złotniki” w północno-zachodniej części

Wrocławia, zajmujących się produkcją siarczanu magnezu, azotanu magnezu oraz azotanu wapnia, oraz w sąsiedztwie Huty Oława w Oławie, produkującej tlenki metali [35, 46, 47].

Stwierdzono, że zawartość metali ciężkich w glebach dzielnicy Różanka charakteryzuje znaczne lokalne zróżnicowanie. Badane gleby zasadniczo odpowiadają standardom jakości gleb i ziem obowiązującymi do 2016 r, choć lokalnie stwierdzono punktowe występowanie znaczniejszego zanieczyszczenia. Całkowite zawartości Cu, Pb oraz Zn w badanych glebach urbanoziemnych są powiązane ze składem granulometrycznym tych gleb i ich pojemnością sorpcyjną. Brak wzbogacenia w metale poziomów powierzchniowych gleb w stosunku do poziomów głębszych stanowi zjawisko nietypowe [35].

Wyniki badań przeprowadzonych w rejonie Zakładów Chemicznych „Złotniki” wskazują, że zakłady te istotnie wpływają na środowisko glebowe terenów położonych w ich bezpośrednim sąsiedztwie. W glebach stwierdzono nadmierną koncentrację cynku i miedzi, co jest skutkiem działalności przemysłowej prowadzonej obecnie oraz w przeszłości [47].

Oddział Huta Oława usytuowany jest w południowo-wschodniej części miasta Oława. Pierwsze informacje o hucie w Oławie pochodzą z 1845 roku. Zakłady te prócz różnych gatunków bieli cynkowej produkowały także minię ołowiową, inne tlenki ołowiu oraz tlenek kadmu. W badaniach gleb sąsiadujących z Hutą stwierdzono, że działalność zakładu istotnie wpłynęła na degradację chemiczną gleb miasta Oławy. Specyfika działalności huty odzwierciedla się w wysokim stopniu zanieczyszczenia gleb cynkiem i ołowiem. Czynniki klimatyczne oraz rodzaj użytkowania terenu istotnie modyfikują całkowitą zawartość metali ciężkich w glebach. Największe koncentracje ołowiu i cynku stwierdzono w południowej i wschodniej części miasta w glebach parków miejskich [46].

Wyjątkowym obiektem na terenie aglomeracji miejskiej Wrocławia są pola irygacyjne, zajmujące powierzchnię ponad 1000 ha, służące przez ponad 100 lat oczyszczaniu ścieków komunalnych. Długotrwałe nawadnianie ściekami komunalnymi może prowadzić do gromadzenia materii organicznej, składników odżywczych i metali ciężkich w glebach. Nadmierna koncentracja metali ciężkich w glebach może stanowić potencjalne zagrożenia dla środowiska i powodować konieczność ograniczenia uprawy roślin. Ryzyko środowiskowe zależy nie tylko od całkowitej zawartości metali w glebach, ale od ich form. Dlatego na terenie pól irygacyjnych we Wrocławiu przeprowadzono badania, w ramach których oznaczono całkowite zawartości pierwiastków śladowych oraz ich frakcje wydzielone metodą sekwencyjnej ekstrakcji wg Zeiena i Brummera. Długoletnie nawadnianie gleb ściekami nie spowodowało ich znaczniejszego zanieczyszczenia miedzią i ołowiem. Ponadto, te metale zgromadzone w powierzchniowej warstwie gleb cechują się ograniczoną mobilnością i biodostępnością, zatem nie stanowią zagrożenia dla łańcucha pokarmowego i jakości wód podziemnych. Jednakże podwyższone stężenie Zn w badanych glebach i przewaga łatwo rozpuszczalnych frakcji tego pierwiastka może stanowić zagrożenie dla jakości wód gruntowych a także dla roślin [11].



#### 4. Rozpuszczalność metali i metaloidów w glebach zanieczyszczonych w kontekście ich remediacji

W różnych metodach remediacji gleb zanieczyszczonych metalami ciężkimi i metaloidami wykorzystuje się zmiany rozpuszczalności tych pierwiastków: strategia immobilizacji opiera się na zmniejszeniu ich rozpuszczalności, a strategia oczyszczania gleb wymaga przejściowego zwiększenia rozpuszczalności zanieczyszczeń. Dlatego w kontekście remediacji, w tym także fitoremediacji, gleb zanieczyszczonych istotne znaczenie ma rozpoznanie czynników decydujących o rozpuszczalności metali i metaloidów.

Problematyka fitoremediacji gleb zanieczyszczonych cieszy się w ostatnich kilkunastu latach dużym zainteresowaniem badaczy. Szczególnie wiele uwagi poświęca się metodom fitoekstrakcji zanieczyszczeń, np. metali ciężkich z gleb. Wobec niewielkiej wydajności procesu pobierania tych pierwiastków z gleby przez rośliny uprawne, a także ograniczonych możliwości wykorzystania tzw. hiperakumulatorów, duże nadzieje wiązano z metodą tzw. indukowanej hiperakumulacji, polegającej na stymulacji pobrania metali przez rośliny wskutek zastosowania substancji kompleksujących, powodujących mobilizację metali do roztworu glebowego. W doświadczeniach nad indukowaną hiperakumulacją różni badacze stosują różne chelatory, zarówno naturalne (np. kwas cytrynowy lub winowy), jak i syntetyczne, np. EDTA, DTPA. Rośliny intensywnie pobierają uruchomione i schelatowane metale, wskutek czego ich koncentracje w biomase mogą przekraczać nawet 1%. Aby zmniejszyć zagrożenie związane ze zwiększeniem stężenia toksycznych pierwiastków w roztworze glebowym różni autorzy proponowali między innymi stosowanie związków chelatujących łatwo podatnych na biodegradację, np. EDDS.

W badaniach poświęconych możliwości zastosowania metody indukowanej hiperakumulacji do oczyszczania gleb zanieczyszczonych przez przemysł miedziowy analizowano możliwość wykorzystania różnych związków kompleksujących, w tym EDTA, kwasu winowego, a także EDDS, stosowanych jednorazowo oraz w dawce dzielonej w różny sposób. Gleby utrzymywano w różnych warunkach wilgotności, symulujących okresy: zwykły – bez intensywnych opadów w czasie 2 tygodni – i mokry, z intensywnymi opadami. Potwierdzono, że EDDS wykazuje silne, selektywne działanie chelatujące w stosunku do miedzi obecnej w glebach zanieczyszczonych, a zastosowanie EDDS, w jednorazowej dawce, powoduje znaczący wzrost zawartości Cu w biomase kukurydzy. Zastosowanie EDDS w dawce podzielonej na 2 lub 4 części nie tylko nie poprawia efektów fitoekstrakcji Cu, ale może je ograniczyć w porównaniu do jednorazowej aplikacji tego odczynnika. Z kolei zastosowanie EDTA, niepodatnego na biodegradację, powoduje trwały wzrost rozpuszczalności i fitotoksyczności metali w glebie [9, 12, 18].

We wszystkich wariantach doświadczenia, ze wszystkimi substancjami kompleksującymi, w tym EDDS, stwierdzono występowanie wysokich stężeń Cu i Pb w roztworze glebowym przez długi czas po aplikacji związków kompleksujących, a obliczenia wykazały, że ilości metali ulegające wymywaniu są wielokrotnie wyższe od pobieranych przez rośliny. Przeprowadzone badania nie wskazują na zasadność kontynuacji prac nad wspomaganie fitoekstrakcji jako metodą remediacji gleb zanieczyszczonych miedzią [36].

Interesującym aspektem badań nad zmianami rozpuszczalności metali w procesach remediacji gleb zanieczyszczonych jest określenie efektów powodowanych przez wprowadzenie do gleb różnych materiałów organicznych [49]. Miedź wykazuje silne powinowactwo do substancji organicznej, co przejawia się w tworzeniu połączeń o charakterze kompleksów. Niektóre organiczne kompleksy Cu wykazują jednak znaczną rozpuszczalność, co może być przyczyną uwalniania zasorbowanej miedzi i jej przechodzenia do roztworu. Celem badań, realizowanych w formie doświadczeń inkubacyjnych, było określenie wpływu osadów ściekowych, stosowanych w procesie remediacji, a także ściółki leśnej tworzącej się na terenach zrehabilitowanych, na rozpuszczalność miedzi w glebach zanieczyszczonych. Wykazano, że stężenia Cu w roztworach glebowych wykazują dużą zmienność w czasie. W ciągu pierwszych 14 dni inkubacji w niektórych wariantach doświadczenia obserwowano silny efekt mobilizacji Cu. Szczególnie intensywnie uwalniana była miedź pod wpływem silnie alkalicznych osadów ściekowych higienizowanych wapnem tlenkowym. Efekt wzrostu stężenia Cu w roztworach glebowych, do  $15 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ , obserwowano także pod wpływem dodatku ściółek leśnych, zwłaszcza ściółki bukowej. Wraz z przedłużającym się czasem inkubacji stężenia Cu w roztworze glebowym zmniejszały się. Udział jonów  $\text{Cu}^{2+}$  w roztworach uwarunkowany był głównie wartością pH gleby i ujawniał się przy obniżaniu pH poniżej 6,5. W warunkach odczynu obojętnego i alkalicznego wysokie stężenia Cu w roztworach glebowych odpowiadały wysokim stężeniom rozpuszczalnego węgla organicznego (RWO), co wskazuje na znaczenie rozpuszczalnej substancji organicznej w mobilizacji Cu. Zgodnie z oczekiwaniami, stabilne osady ściekowe, kompostowane na przyłomie, spowodowały ograniczenie rozpuszczalności Cu w glebach [49].

## 5. Rekultywacja gleb i hałd odpadów przemysłowych na terenach górniczych

Polskie kopalnie węgla brunatnego systematycznie dokonują rekultywacji i zagospodarowania terenów, na których zakończona została eksploatacja lub zwałowanie odpadów, w miarę przesuwania się frontów eksploatacyjnych. Wykonywane prace zapewniają możliwość wykorzystania terenów do produkcji rolnej, leśnej lub też innej działalności, w tym rekreacyjnej.

Badania dotyczące właściwości gleb na rekultywowanych terenach górniczych prowadzono na różnych obiektach związanych z odkrywkowym górnictwem węgla brunatnego (w tym na zwałowisku zewnętrznym kopalni KWB „Bełchatów” i zwałowisku wewnętrznym kopalni KWB „Adamów”) [31, 48] oraz na hałdach skały płonnej górnictwa węgla kamiennego w Górnośląskim i Dolnośląskim Zagłębiu Węglowym [38, 40, 42].

Zwałowisko zewnętrzne nadkładu KWB „Bełchatów” zajmuje obszar o łącznej powierzchni 1648 ha. Budowę zwałowiska rozpoczęto w czerwcu 1977 roku, a zakończono w listopadzie 1993 roku. Od momentu zakończenia formowania pierwszej stałej skarpy zwałowiska rekultywacja prowadzona była w kierunku leśnym, aż do roku 1994. Skład gatunkowy wprowadzanej roślinności drzewiastej stanowią w 75% gatunki lasotwórcze (między innymi: dąb bezszypułkowy, drobnolistny i czerwony, sosna zwyczajna, modrzew europejski, klon jawor, brzoza brodawkowata), zaś 20% tzw. gatunki fitomelioracyjne (olsza czarna i szara,

robinia akacjowa), które wzbogacają podłoże glebowe w azot. Pozostałe 5% stanowią gatunki biocenotyczne i uzupełniające. Cała podlegająca rekultywacji powierzchnia zwałowiska zewnętrznego uznana jest obecnie za zrekultywowaną i przekazana do użytkowania Lasom Państwowym. Celem pracy było określenie wpływu czasu rekultywacji leśnej na wybrane właściwości fizykochemiczne i chemiczne gleb zwałowiska zewnętrznego KWB „Bełchatów”. Na badanym obiekcie nie zaobserwowano zasadniczego wpływu wieku rekultywacji na właściwości fizykochemiczne i chemiczne badanych gleb, co wiąże się to ze zbyt krótkim okresem czasu, jaki upłynął od momentu wykonania pierwszych nasadzeń. Zmiany stosunku C:N oraz zwiększanie się pojemności sorpcyjnej w poziomach wierzchnich gleb wraz z wiekiem świadczą jednak o prawidłowym kierunku procesów glebowych w wyniku zastosowanych zabiegów rekultywacyjnych [31].

Eksploatacja węgla kamiennego w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym trwa nieprzerwanie od drugiej połowy XVIII w., a towarzyszą jej znaczne przekształcenia geomechaniczne terenu, między innymi związane z deponowaniem dużej ilości odpadów górniczych w postaci zwałowisk nadpoziomowych – przyzakładowych i centralnych. Eksploatację węgla w Dolnośląskim Zagłębiu Węglowym zakończono na przełomie XX i XXI w., między innymi ze względów ekonomicznych oraz geologicznych. Zagłębie obejmowało dwa rejony górnicze: Wałbrzych i Nowa Ruda. W rejonach tych pozostały zwały odpadów górniczych, głównie o stożkowym, groblowym lub nieregularnym kształcie i o stromych skarpach.

Zwały odpadów wydobywczych górnictwa węgla kamiennego są trudne do rekultywacji. Skalę płonną tworzą łupki ilaste i ilowce, mułowce, piaskowce oraz domieszki węgla. Ważnym składnikiem jest piryt  $\text{FeS}_2$ , którego utlenianie prowadzi zazwyczaj do zakwaszenia i zasolenia odpadów oraz zainicjowania aktywności termicznej. Hałdy mogą pozostawać aktywne termicznie przez wiele miesięcy lub lat.

Rekultywacja biologiczna hałd górnictwa węgla kamiennego jest najłatwiejsza, jeśli skała płonna pokryta zostanie warstwą gruntu potencjalnie produktywnego. Jednak wobec braku takiego materiału, można zastosować metodę nasadzeń w dołki lub sadzić drzewa bezpośrednio w grunt hałdy. Czynnikiem ograniczającym wzrost roślin może być niedostateczna zasobność gruntu w składniki pokarmowe, w tym w przyswajalny azot. Badaniem, których celem było sporządzenie ogólnej oceny efektów rekultywacji, objęto wybrane hałdy górnictwa węgla kamiennego Zagłębia Dolnośląskiego i Górnośląskiego. Przedstawiono docelowe kierunki zagospodarowania wybranych obiektów w okolicach Nowej Rudy (Wałbrzyski Okręg Węglowy) [38] oraz Pniówka, Pszowa, Radlina, i Jastrzębia Zdroju, należących do Rybnickiego Okręgu Węglowego [40, 42]. Ukazano pozytywne i negatywne strony różnych sposobów rekultywacji i zagospodarowania tych obiektów, z jednoczesnym przytoczeniem nowatorskich metod zagospodarowania. Hałda „Piast” w Nowej Rudzie, charakteryzuje się nieregularnym kształtem, dużym nachyleniem skarp oraz aktywnością termiczną. W latach 90. w dolnej części zwału oraz na fragmentach skarp prowadzono zabiegi rekultywacyjne, jednak kompleksową rekultywację można było projektować dopiero po zlikwidowaniu termicznej aktywności hałdy. Lokalnie, w drodze samoistnej sukcesji stwierdzono wkraczanie na powierzchnię hałdy roślin,

zwłaszcza roślin zielnych, takich jak starzec lepki, przymiotno kanadyjskie, podbiał pospolity i trzcinnik piaskowy, a także brzozy brodawkowatej. Na większości powierzchni wierzchowiny praktycznie brak roślinności. Hałda „Słupiec” w Nowej Rudzie została już ukształtowana w drodze rekultywacji technicznej oraz przeprowadzono rekultywację biologiczną w kierunku leśnym [38]. Wybrane hałdy Rybnickiego Okręgu Węglowego rekultywowano w kierunku leśnym oraz rekreacyjno-parkowym [40]. Do największych zwałowisk polskiego górnictwa węgla kamiennego należy „Kościelniok” – obiekt należący do kopalni KWK Pniówek w Pawłowicach, położony na granicy gmin Pawłowice oraz Jastrzębie Zdrój. Docelowy kierunek zagospodarowania został zmodyfikowany: z leśnego na rekreacyjno-sportowy. Podczas gdy w wierzchowinowej części zwałowiska trwa nadal składowanie odpadów górniczych, część zwałowiska oraz dolne partie skarp były sukcesywnie formowane, przykrywane warstwą materiału glebowego i poddawane rekultywacji biologicznej. Stwierdzono, że właściwości odpadów w części zwałowiska przykrytej warstwą 40 cm materiału potencjalnie produktywnego, pyłowo-ilastego, pozostają zbliżone do właściwości odpadów nie rekultywowanych o podobnym czasie składowania. Zawartość pierwiastków metalicznych (Pb, Zn i Cu), a także aktywność promieniotwórcza badanych próbek glebowych jest niska i nie ogranicza przyszłego leśnego lub rekreacyjnego zagospodarowania obiektu [42].

#### IV. Wskaźniki parametryczne dorobku naukowego

1. Sumaryczny Impact Factor publikacji naukowych według listy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania: 8,496
2. Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science: 110
3. Indeks Hirscha opublikowanych publikacji według bazy Web of Science: 7
4. Łączny dorobek naukowy wg punktacji zgodnej z rokiem publikacji w czasopismach z listy czasopism punktowanych MNiSW: 403

Wrocław, 15.09.2017

  
dr inż. Katarzyna Szopka