Załącznik nr 2

AUTOREFERAT

przedstawiający życiorys naukowy wnioskodawcy oraz osiągnięcie naukowe, zgłaszane jako przedmiot postępowania habilitacyjnego, a także pozostałe osiągnięcia naukowe

Dr Grzegorz Siebielec

Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy

Zakład Gleboznawstwa Erozji i Ochrony Gruntów

Puławy 2018

AUTOREFERAT

I. Imię i nazwisko: Grzegorz Siebielec

II. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe

1995 - Tytuł magistra inżyniera nauko rolniczych

Akademia Rolnicza w Lublinie, Wydział Rolniczy; Praca magisterska „Wpływ nawadniania łąki wodami dołowymi LZW na właściwości i skład chemiczny gleby torfowej". Promotor Prof. dr hab. Józef Borowiec

2001 - Tytuł doktora nauk rolniczych

Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach. Praca doktorska „Wpływ cynku, ołowiu i kadmu na wybrane biologiczne wskaźniki gleb użytkowanych rolniczo w rejonie Tarnowskich Gór." Promotor: Prof. dr hab. Alina Kabata-Pendias

III. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych:

1996-2001 doktorant - Zakład Gleboznawstwa Erozji i Ochrony Gruntów, Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach

2001-2011 adiunkt - Zakład Gleboznawstwa Erozji i Ochrony Gruntów, Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy w Puławach

2012 – do chwili obecnej Kierownik Zakładu Gleboznawstwa Erozji i Ochrony Gruntów, Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy w Puławach

Przebieg pracy naukowej przed uzyskaniem stopnia doktora

Moja praca naukowa przed uzyskaniem stopnia doktora odbywała się w ramach Studium Doktoranckiego w Instytucie Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach (1996-2001). Znaczną część tego okresu wypełnił staż naukowy w ośrodku USDA w Beltsville (1,5 roku w okresie 1998-1999), gdzie prowadziłem badania pod kierunkiem Dr Rufusa Chaneya, cenionego na świecie naukowca w dziedzinie zanieczyszczeń i remediacji gleb. Staż zaowocował publikacją ***Li i in. (2000; pozycja II.A.1 wykazu opublikowanych prac naukowych)*** opublikowaną w Journal of Environmental Quality oraz publikacją przeglądową w czasopiśmie REVista INTernacional de CONTAMinacion AMBIENTal (***Chaney i in., 2000; II.A.2***), które w roku wydania nie znajdowało się ma liście JRC, a znalazło się na niej w latach późniejszych. Moje badania w tym okresie skupiały się na ocenie efektywności wapnowania i stosowania kompostów w ograniczaniu rozpuszczalności metali w glebach zanieczyszczonych kadmem, cynkiem i ołowiem.

Byłem również współautorem rozdziału „Heavy metal aspects of compost use" (**Chaney i in., 2001; II.D.3**), który przedstawiał zagadnienia ryzyka związanego ze stosowaniem kompostów i odpadów organicznych, a także przydatności kompostów w unieruchamianiu metali w glebie, oraz biodostępności metali wprowadzanych wraz z organicznymi dodatkami do gleby.

Z kolei w pozostałym okresie przed uzyskaniem tytułu doktora uczestniczyłem we wstępnych badaniach nad rekultywacją składowisk odpadów pohutniczych (w tym zakładanie doświadczeń wieloletnich) oraz ich wpływem na migrację metali oraz akumulację metali w roślinach. Badania te zaowocowały rozdziałem ***Stuczyński i in. (2000; II.D.2***), którego byłem współautorem. Współuczestniczyłem również w badaniach prowadzonych we współpracy zagranicznej przez Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa i USDA Beltsville nad wpływem zanieczyszczenia gleb metalami na aktywność mikroorganizmów i wyborem najbardziej wrażliwych parametrów mikrobiologicznych do oceny skutków zanieczyszczenia gleb. Badania te zaowocowały publikacją impaktową, która ukazała się już po otrzymaniu przeze mnie stopnie doktora (***Stuczyński i in., 2003; II.A.3***).

IV. Wskazanie osiągnięcia naukowego wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.).

a) Tytuł osiągnięcia naukowego:

„OPTYMALIZACJA PRZYRODNICZYCH METOD REMEDIACJI GLEB ZANIECZYSZCZONYCH PIERWIASTKAMI ŚLADOWYMI"

b) Wykaz publikacji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego

Nr	Autorzy/tytuł/czasopismo	Punkty MNiSzW w roku wydania	Impact Factor (IF) w roku wydania	Liczba cytowań wg WoS
1	**Siebielec G.**, T. Stuczyński, R. Korzeniowska-Pucułek. 2006. Metal bioavailability in long term contaminated soils of Tarnowskie Gory area. Polish Journal of Environmental Studies, 15: 121-129	13	0,353	23
2	**Siebielec G.**, R.L. Chaney. 2006. Mn fertilizer requirement to prevent Mn deficiency when liming to remediate Ni-phytotoxic soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 37: 163-179	15	0,302	9
3	**Siebielec G.**, R.L. Chaney, U. Kukier. 2007. Liming to remediate Ni contaminated soils with diverse properties and a wide range of Ni concentration. Plant and Soil 299: 117-130	24	1,821	22
4	Stuczyński T., **G. Siebielec**, W. Daniels, G. McCarty, R. Chaney. 2007. Biological aspects of metal waste reclamation with biosolids. Journal of Environmental Quality, 36: 1154-1162	24	2,331	29
5	**Siebielec G.**, R.L. Chaney. 2012. Testing amendments for remediation of military range contaminated soil. Journal of Environmental Management, 108: 8-13	35	3,057	14
6	**Siebielec G.**, A. Ukalska-Jaruga, P. Kidd. 2015. Bioavailability of trace elements in soils amended with high-phosphate materials. *W* Selim M. (Ed.): Phospate in soils. Interaction with micronutrients, radionuclides and heavy metals. CRC Press, Boca Raton, FL, p. 237-267	5	-	-
7	Siebielec S., **G. Siebielec**, T. Stuczyński, P. Sugier, E. Grzęda, J. Grządziel. 2018. Long term insight into biodiversity of a smelter wasteland reclaimed with biosolids and by-product lime. Science of the Total Environment, 636: 1048–1057	40	4,900	-
	Razem	**159**	**12,764**	**97**

Na osiągnięcie naukowe składa się cykl **7 publikacji**, których sumaryczny Impact Factor wg roku publikacji wynosi **12,764**. Sumaryczna liczba punktów za rok wydania wynosi **159**, natomiast łączna liczba cytowań wg Web of Science (All databases), stan na 04.06.2018, wynosi **97**.

Informacje na temat wkładu pracy wszystkich autorów podczas przygotowywania publikacji są zawarte w załączniku nr 5 (Oświadczenia dotyczące indywidualnego wkładu habilitanta w autorstwo prac oraz oświadczenia współautorów publikacji).

c) **Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania**

OPTYMALIZACJA PRZYRODNICZYCH METOD REMEDIACJI GLEB ZANIECZYSZCZONYCH PIERWIASTKAMI ŚLADOWYMI

Wprowadzenie i omówienie celu prac

Zanieczyszczenie gleb zostało określone przez Komisję Europejską jako jedno z podstawowych zagrożeń dla jakości gleb, obok takich przejawów degradacji jak erozja, utrata materii organicznej, zasklepianie, zasolenie, itd. (COM, 2016). Do najistotniejszych grup trwałych zanieczyszczeń gleb należą pierwiastki śladowe oraz trwałe zanieczyszczenia organiczne, które grupują między innymi dioksyny i furany, polichlorowane bifenyle oraz wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne. W grupie pierwiastków śladowych znajdują się szczególnie toksyczne pierwiastki, takie jak kadm, ołów, arsen i rtęć, dla których nie wykazano dotychczas pozytywnej roli dla organizmów żywych i roślin. Ponadto nawet pierwiastki pełniące rolę mikroelementów, mogą przy wysokich zawartościach w glebie i w określonych warunkach oddziaływać toksycznie.

Gleby zanieczyszczone nie stanową znacznego odsetka wszystkich gruntów w Europie i na świecie, jednak liczba zanieczyszczonych obiektów jest bardzo duża. Według danych zebranych w ramach działalności sieci EIONET-SOIL (the European Environment Information and Observation Network for soil), w której reprezentuję kraj, liczba potencjalnie zanieczyszczonych obiektów w Europie wynosi 2,5 miliona a liczba zidentyfikowanych zanieczyszczonych obiektów około 342 tysiące (Panagos i in., 2013). Roczny koszt zarządzania tymi obiektami był szacowany na 6 miliardów Euro. Należy jednak dodać, że nie wszystkie kraje europejskie dostarczyły dane, z uwagi na brak w pełni efektywnych krajowych rejestrów obszarów zanieczyszczonych.

Zanieczyszczenie gleb pierwiastkami śladowymi powoduje lokalnie szereg problemów, do których należą narażenie ludzi i zwierząt na zanieczyszczenia oraz fitotoksyczność i ekotoksyczność zanieczyszczeń. Funkcje ekosystemowe gruntu są zaburzone, spada wartość gruntu z uwagi na konieczność rewitalizacji gleb i ograniczenie możliwości wykorzystania gruntu. Narażenie ludzi na potencjalnie toksyczne pierwiastki śladowe (PTTE – potentially toxic trace elements; PTPŚ – potencjalnie toksyczne pierwiastki śladowe) zawarte w glebie następuje różnymi drogami, włączając bezpośrednie spożycie gleby (dzieci), inhalację (pracownicy w budownictwie i rolnictwie), a przede wszystkim drogą niebezpośrednią – z zanieczyszczoną wodą lub przez łańcuch pokarmowy.

W praktyce na świecie problem zanieczyszczenia gleb pierwiastkami śladowymi wiąże się głównie z takimi metalami, jak cynk (Zn), kadm (Cd), ołów (Pb), miedź (Cu), nikiel (Ni). W niektórych krajach i w nieco mniejszym stopniu problem stanowi również zanieczyszczenie gleb arsenem (As). W Polsce występują zanieczyszczenia gleb Zn, Cd, Pb i Cu, zarówno ze źródeł punktowych, jak i rozproszonych. Negatywne działanie Zn i Cu objawia się toksycznością dla roślin, natomiast Cd, Pb i As w określonych warunkach stanowią zagrożenie dla zwierząt i ludzi.

Gleby zanieczyszczone pierwiastkami śladowymi wymagają zabiegów remediacyjnych, aby ograniczyć negatywne skutki zanieczyszczenia. Znany jest szereg metod potencjalnie przydatnych w remediacji gleb. Metody inżynieryjne polegające na oczyszczaniu gleb ex-situ są jednak nadmiernie kosztowne i zbyt inwazyjne, a metody fitoekstrakcyjne (zastosowanie roślin o własnościach akumulacji pierwiastków w tkankach roślin) nie zapewnia wyraźnego efektu w krótkim czasie. Z tego powodu należy oczekiwać, że większą przydatność i popularność będą zyskiwać metody oparte na stabilizacji pierwiastków śladowych w glebie. Przy takim podejściu pierwiastki nie są usuwane z gleby a głównym celem działań jest ograniczenie ich szkodliwości oraz ich wtórnej dyspersji z gleb.

Za stosowaniem metod stabilizacyjnych przemawia również stosunkowo niski koszt metod stabilizacyjnych. Ich szerszemu stosowaniu w najbliższej przyszłości może sprzyjać dopuszczenie przyrodniczych metod remediacji gleb, które umożliwia znowelizowana w 2014r. ustawa Prawo Ochrony Środowiska (Dz. U. z 2014, poz. 1011). Do ustawy wprowadzono wówczas pojęcie remediacji gleb, czyli poddania gleby, ziemi i wód gruntowych działaniom mającym na celu usunięcie lub zmniejszenie ilości substancji powodujących ryzyko, ale również ich kontrolowanie oraz ograniczenie rozprzestrzeniania się. Ustawa w obecnym kształcie dopuszcza zatem metody polegające na ograniczaniu mobilności i biodostępności zanieczyszczeń jako właściwe sposoby zarządzania zanieczyszczonymi glebami. Do tych metod należy zaliczyć fitostabilizację i fitostabilizację wspomaganą gleb.

Fitostabilizacja gleb zanieczyszczonych opiera się na zastosowaniu roślin, które tworzą zwartą pokrywę, wiążą korzeniami wierzchnią warstwę gleby i ograniczają dyspersję zanieczyszczeń z gleby poprzez ograniczenie erozji gleby i wymywania zanieczyszczeń. Z kolei fitostabilizacja wspomagana (*assisted phytostabilisation*) uwzględnia dodatkowo zastosowanie dodatków do gleby (sorbentów), które inaktywują zanieczyszczenia i/lub poprawiają warunki rozwoju roślin. W autoreferacie dodatki do gleby będą dla uproszczenia nazywane sorbentami, niezależnie od tego jaki proces inaktywacji metali dominuje po zastosowaniu danego dodatku do gleby.

Najistotniejszy jest jednak dobór skutecznych metod do określonych warunków, oraz ich optymalne zastosowanie, tak by zapewnić pożądany efekt w postaci redukcji ryzyka przy racjonalnym wydatkowaniu środków finansowych, które z reguły są w takich sytuacjach ograniczone.

Celem badań było uzyskanie wiedzy i znaczącego postępu w zakresie optymalizacji procesów fitostabilizacji gleb zanieczyszczonych metalami. Dla realizacji głównego celu założono następujące cele szczegółowe:

I. Określenie czynników kształtujących potrzebę remediacji gleb oraz rozwój wskaźników dla określania potrzeb i skuteczności remediacji
II. Określenie najbardziej skutecznych sorbentów w procesie wspomaganej fitostabilizacji ekstremalnie zanieczyszczonych gleb
III. Ocena wpływu najbardziej skutecznych sorbentów na biodostępność metali
IV. Określenie trwałości fitostabilizacji silnie zanieczyszczonych gruntów

Omówienie wyników badań będących podstawą osiągnięcia

I. Określenie czynników kształtujących potrzebę remediacji gleb oraz rozwój wskaźników dla określania potrzeb i skuteczności remediacji

Przez wiele lat w większości krajów w ocenie stopnia zanieczyszczenia gleb metalami i potrzeb działań naprawczych funkcjonowało podejście oparte na całkowitych zawartościach metali w glebie. Podobne podejście funkcjonowało w Polsce, pomimo, że Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa w połowie lat 90-tych wydał wytyczne dla oceny zanieczyszczenia gleb, które obok całkowitej zawartości pierwiastków brały pod uwagę właściwości gleby, potencjalnie wpływające na mobilność metali (odczyn, skład granulometryczny, zawartość próchnicy) (Kabata-Pendias i in., 1995). Wytyczne te nie miały jednak nigdy charakteru obligatoryjnego. Standardy jakości gleb wprowadzone rozporządzeniem Ministra Środowiska w 2002 roku opierały się wyłącznie na całkowitych zawartościach pierwiastków, określonych jako liczby graniczne dla określonego typu użytkowania gruntu. Dopiero w 2016 r. nastąpiła nowelizacja przepisów (Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 września 2016 r. w sprawie sposobu prowadzenia oceny zanieczyszczenia powierzchni ziemi; Dz.U. z dnia 5 września 2016 r. Poz. 1395), po której w ocenie zanieczyszczenia gleb i potrzeb ich remediacji stosuje się również właściwości gleby, a ściślej mówiąc graniczna wartość całkowitej zawartości pierwiastka jest zależna od wspomnianych wcześniej odczynu, tekstury gleby i zawartości próchnicy.

Podobne podejście do wyznaczania potrzeb remediacji, oparte na całkowitych zawartościach metali, obowiązywało w większości krajów. Ponadto, aż do 2014r. przepisy w Polsce wymagały usuwania metali z gleby, nie dopuszczano prawnie metod przyrodniczych, nakierowanych na ograniczenie negatywnych skutków zanieczyszczenia.

W przeszłości, głównie w oparciu o badania, w których stosowano sole metali, powstało ogólne przekonanie o bardzo dużej szkodliwości metali w glebie dla roślin, mikroorganizmów, a także zwierząt i ludzi. W badaniach ekotoksykologicznych opartych na stosowaniu soli metali do gleby, najczęściej następowało przeszacowanie skutków zanieczyszczenia gleb, a w konsekwencji przeszacowanie potrzeb oczyszczania gleb przy określonej całkowitej zawartości pierwiastka. Wprowadzenie rozpuszczalnych soli metali do gleby powoduje powstanie dużej puli metali w roztworze glebowym, nie odzwierciadlającej warunków rzeczywistych. W glebach o wieloletnim charakterze zanieczyszczenia metale podlegają reakcjom nazywanym „starzeniem" się zanieczyszczenia lub uwstecznianiem metali. W glebie zachodzą reakcje wytrącania i adsorpcji metali. Ponadto metale w glebie pochodzą z różnych źródeł, w tym również ze skały macierzystej, które wpływają na poziom mobilności lub biodostępności zanieczyszczeń. Z tych powodów ocena zagrożenia związanego z zanieczyszczaniem gleb oraz ocena potrzeb działań, oparta na całkowitej zawartości metali staje się bardzo nieprecyzyjna.

Badania przedstawione w artykule ***Siebielec i in. (2006, publikacja nr 1 osiągnięcia; I.B.1)*** stanowią zaprzeczenie wielu dotychczasowych tez. W artykule dokonano oceny biodostępności i toksyczności Cd, Zn i Pb w zanieczyszczonych glebach rejonu Tarnowskich Gór na podstawie zróżnicowanych gleb, reprezentatywnych dla tego obszaru. Jak wykazały badania, pomimo wysokich zawartości metali w glebie, wielokrotnie przekraczających

ówczesne i obecne wartości graniczne dla gleb użytkowanych rolniczo, stwierdzono niską mobilność i biodostępność metali. Fakt ten wykazano pomimo, że zawartości Zn i Pb sięgały kilku tysięcy mg kg^{-1} a zawartości Cd prawie 40 mg kg^{-1}. Praktycznie nie stwierdzono zjawisk toksyczności metali dla roślin w testach wazonowych, niezależnie od zawartości całkowitej, a aktywność biochemiczna gleb wyrażoną aktywnością enzymów glebowych, nie była zależna od poziomu zanieczyszczenia. Przeciwnie, glebami najbardziej aktywnymi biochemicznie (również pod względem intensywności nitryfikacji, określanej jako najbardziej wrażliwy wskaźnik), były gleby najbardziej zanieczyszczone metalami, o czym decydowała wysoka zawartość iłu koloidalnego, uregulowany odczyn i stosunkowo wysoka zawartość materii organicznej. Ponadto ekstrakcje symulujące biodostępność ołowiu w warunkach zbliżonych do tych obecnych w przewodzie pokarmowym ludzi (tzw. *in-vitro bioaccessibility*) (Ruby i in., 1996) wykazały, że udział frakcji biodostępnej, wyrażany procentem całkowitej zawartości, był najniższy w najbardziej zanieczyszczonych glebach, co dodatkowo potwierdza niską biodostępność i zarazem niską szkodliwość metali w glebach badanego regionu. Mobilność i biodostępność metali nie była skorelowana z całkowitą zawartością a istotnie statystycznie zależała jedynie od odczynu gleb. Czynniki kształtujące niską biodostępność metali w glebach Tarnowskich Gór to wieloletni charakter zanieczyszczenia (reakcje uwsteczniania), duża pojemność sorpcyjna gleb, uregulowany odczyn oraz fakt, iż metale częściowo pochodzą ze źródeł naturalnych (skała macierzysta – zasobne w metale skały węglanowe).

Zbliżone wnioski płyną z badań opisanych w pracach ***Siebielec i Chaney (2006 – nr 2 osiągnięcia; I.B.2) oraz Siebielec i in. (2007 – nr 3 osiągnięcia; I.B.3)***. Badania dotyczyły gleb zanieczyszczonych niklem w rejonie Port Colborne, Kanada. Gleby tego obszaru zostały zanieczyszczone w wyniki emisji z rafinerii niklu, co w interakcji z kwaśnym odczynem gleby spowodowało zjawiska fitotoksyczności Ni i wyraźne spadki plonu praktycznie wszystkich uprawianych tam roślin. **Moje badania wykazały decydujący wpływ odczynu gleby i zawartości iłu koloidalnego w glebie na fitotoksyczność niklu**. Przy niemal równych zawartościach całkowitych niklu, gleba mineralna była ponadto znacznie bardziej toksyczna dla roślin testowych niż gleba organiczna. Mniejsza toksyczność Ni w glebie pochodzenia organicznego wynika z dużego powinowactwa Ni do substancji organicznej (***Siebielec i Chaney, 2006; nr 2 osiągnięcia; I.B.2***). Również rozpuszczalność Ni, mierzona ekstrakcją w 0,01M azotanie strontu, była zdecydowanie niższa w glebie organicznej. Jednocześnie w przypadku gleby organicznej nie stwierdzono fitotoksyczności Ni dla roślin, a w przypadku gleby mineralnej podniesienie pH gleby do poziomu 7,5 (w H_2O) zapewniało pełne uniknięcie toksyczności dla roślin charakteryzujących się dużą wrażliwością na zanieczyszczenie niklem.

W pracy ***Siebielec i in. (2007; nr 3 osiągnięcia; I.B.3)*** **udowodniono, że całkowita zawartość Ni nie stanowi wiarygodnego wskaźnika toksyczności Ni dla roślin ani nie określa wystarczająco potrzeb remediacji gleb**. Ówczesne przepisy obowiązujące w regionie Ontario zmuszały do wymiany zanieczyszczonej warstwy gleby, jeśli całkowita zawartość Ni przekraczała 200 mg kg^{-1}. Moje badania wykazały, że wszystkie gleby o całkowitej zawartości Ni w zakresie 203 – 4430 nie są toksyczne dla wrażliwych roślin przy alkalicznym odczynie. Nie wymagają zatem żadnych innych zabiegów poza wapnowaniem,

tym bardziej, że zanieczyszczenie gleb Ni nie powoduje żadnego ryzyka dla ludzi. Jedynie na najbardziej zanieczyszczonej glebie zlokalizowanej w bezpośredniej bliskości rafinerii (o zawartości Ni 1,2%) wciąż obserwowano objawy toksyczności Ni na roślinach (chlorozy) przy alkalicznym odczynie. Należy jednak dodać, że plon roślin na tej glebie był zadowalający po regulacji odczynu.

Badania zawarte w pracach ***Siebielec i in. (2006, I.B.1), Siebielec i Chaney (2006; I.B.2) oraz Siebielec i in. (2007; I.B.3) (nr 1-3 osiągnięcia)*** **udowadniają zatem, że oznaczenia całkowitej zawartości metali nie są wskaźnikiem prowadzącym do właściwej oceny toksyczności metali w glebie oraz potrzeb jakiejkolwiek remediacji gleb, lub stosowania dodatkowych zabiegów oprócz wapnowania gleb, tradycyjnie zalecanego dla ograniczenia ryzyka na terenach zanieczyszczonych. Znacznie lepiej niż całkowita zawartość metali przewidują ich rozpuszczalność ekstrakcje w słabych roztworach neutralnych soli**, takich jak 0,01M chlorek wapnia lub 0,01M azotan strontu (***Siebielec i in., 2006; I.B.1; Siebielec i Chaney, 2006; I.B.2; Siebielec i in., 2007; I.B.3***). Wykazano ponadto, że **ekstrakcje w roztworach organicznych związków chelatujących (takich jak DTPA, EDTA) znacznie słabiej symulują dostępność metali dla roślin, szczególnie w przypadku oceny różnych gleb**, gdyż z reguły uzyskane w ten sposób zawartości metali są skorelowane z całkowitą zawartością metali. Ponadto w przypadku ekstremalnie zanieczyszczonych gleb dochodzi do wysycenia kompleksu przy zastosowaniu oryginalnego stosunku gleba:roztwór 1:2 (Lindsay i Norvell, 1978). W publikacji ***Li i in. (2000; II.A.1)***, wraz z innymi współautorami, po raz pierwszy na świecie wykazałem, że kompleks DTPA zostaje wysycony metalami przy zastosowaniu oryginalnej procedury, nie odzwierciedlając ich rzeczywistej rozpuszczalności. W badaniach opisanych w pracach ***Siebielec i Chaney (2006; I.B.2) oraz Siebielec i in. (2007; I.B.3) (nr 2 i 3 osiągnięcia)*** zastosowano rozszerzoną proporcję gleba:roztwór i potwierdzono zasadność modyfikacji oryginalnej metody przy badaniach gleb silnie zanieczyszczonych.

Pomocniczo w określaniu potrzeb remediacji gleb mogą być stosowane takie oznaczenia jak intensywność nitryfikacji lub biodostępność *in-vitro,* gdyż określają związane z zanieczyszczeniem ryzyko dla procesów mikrobiologicznych w glebie oraz zagrożenie dla ludzi lub zwierząt w przypadku nieumyślnego spożycia gleby (np. dzieci w czasie zabaw lub pracownicy w czasie prac rolniczych lub ziemnych).

Jak wykazano, **o toksyczności metali w glebie decydują głównie takie właściwości gleb, jak odczyn, zawartość iłu koloidalnego i zawartość materii organicznej, szczególnie w glebach o wieloletnim charakterze zanieczyszczenia, oraz źródło zanieczyszczenia. W glebach ciężkich i zasobnych w materię organiczną metale charakteryzują się niską mobilnością i biodostępnością i inne działania niż wapnowanie gleb z reguły nie są konieczne.** Nie należy się spodziewać, że dalsze zabiegi i stosowanie dodatkowych sorbentów spowodują znaczny skutek w dalszej redukcji biodostępności metali, gdyż jest ona na wystarczająco niskim poziomie. W takiej sytuacji kolejnym krokiem mogą być jedynie zabiegi mitygacyjne, np. w postaci doboru roślin lub odmian gromadzących mniej potencjalnie toksycznych metali, lub inne niż rolnicze użytkowanie terenu.

II. Określenie najbardziej skutecznych sorbentów w procesie wspomaganej fitostabilizacji ekstremalnie zanieczyszczonych gleb

Jak wspomniano wcześniej, aktualne przepisy zakładają ograniczenie rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń jako jedno z podejść do zarządzania zanieczyszczonymi glebami. W glebach ekstremalnie zanieczyszczonych metalami lub w przypadku nietypowego źródła zanieczyszczenia, regulacja odczynu gleb może nie być zabiegiem wystarczającym. W pracach ***Stuczyński i in. (2007, nr 4 osiągnięcia; I.B.4) oraz Siebielec i Chaney (2012, nr 5 osiągnięcia; I.B.5)*** testowano skuteczność różnych sorbentów we wspomaganej fitostabilizacji, odpowiednio: składowisk odpadów pohutniczych, i gleb poligonowych. W badaniach tych skuteczność fitostabilizacji określano za pomocą reakcji roślin i rozpuszczalności pierwiastków, gdyż ograniczenie fitotoksyczności zapewnia pokrywę roślinną stabilizującą glebę a rozpuszczalność jest miarą rozprzestrzeniania się pierwiastków.

Składowiska odpadów z hutnictwa cynku i ołowiu (żużli lub odpadów poflotacyjnych) stanowią na obszarze Górnego Śląska i innych terenów poprzemysłowych w Europie istotny problem środowiskowy i realne źródło ryzyka dla zdrowia ludzi. Dla przykładu, odpady zdeponowane na składowiskach zlokalizowanych w Piekarach Śląskich zawierają do 12% Zn, 5% Pb i 0,35% Cd w suchej masie. Ponadto odpad nie zawiera typowych składników gleby decydujących o właściwościach sorpcyjnych i retencyjnych (materia organiczna i ił koloidalny) (***Stuczyński i in., 2007; nr 4 osiągnięcia; I.B.4***). Fakt ten powoduje, że bardzo duża pula metali jest mobilna a Zn działa toksycznie na rośliny. Z kolei gleby poligonowe bardzo często zawierają bardzo wysokie zawartości metali, głównie Zn i Pb, często Cu a rzadziej Cd. Ponadto Pb i Zn często występują w stosunkowo łatwo rozpuszczalnych formach jako efekt stałych procesów wietrzenia pozostałości amunicji, a obecność innych zanieczyszczeń w postaci związków organicznych dodatkowo utrudnia rewitalizację gleby. Zarówno w przypadku składowisk odpadów pohutniczych, jak i skażonych gleb poligonowych, wyzwaniem jest wprowadzenie wegetacji dla ograniczenia erozji gleby i dalszej dyspersji zanieczyszczeń. Procesy spontanicznej sukcesji roślin są zbyt powolne, dlatego podejście zwane naturalną atenuacją („*natural attenuation*") nie zdają w tych warunkach egzaminu.

Z uwagi na dużą mobilność i fitotoksyczność Zn oraz znaczną biodostępność Cd i Pb niezbędne jest zastosowanie fitostabilizacji wspomaganej sorbentami, gdyż jak wykazano zastosowanie jedynie wapnowania nie jest skuteczne.

W moich badaniach skupiałem szczególną uwagę na materiałach organicznych, zawierających ponadto znaczne ilości fosforu (P) i żelaza (Fe), tak by wykorzystać potencjał trzech różnych mechanizmów ograniczania rozpuszczalności metali. Materia organiczna zwiększa pojemność sorpcyjną gleby i poprawia warunki rozwoju roślin (składniki nawozowe, lepsze warunki wodne), fosfor powoduje wytrącanie się słabo rozpuszczalnych związków Zn i Pb a tlenki żelaza dodatkowo zwiększają adsorpcję metali. Stąd w badaniach (***nr 4-6 osiągnięcia; I.B.4-6***) testowano osady ściekowe oraz komposty. Osad ściekowy testowany w doświadczeniu polowym na składowisku w Piekarach, oraz wytworzony z odpadów komunalnych kompost „Orgro", testowany w doświadczeniu wazonowym z glebą z Aberdeen, MD, zawierały odpowiednio, 2,0% P i 2,4% Fe oraz 1,85% P i 3,6% Fe. Podobnie,

komposty testowane w badaniach przywoływanych w ***Siebielec i in. (2015; nr 6 osiągnięcia; I.B.6)***, zawierały znaczące ilości fosforu i żelaza.

W opisywanych doświadczeniach **wykazano, że wspomniane sorbenty organiczne były bardzo skuteczne w ograniczaniu toksyczności metali dla roślin, co w perspektywie może zapewnić trwałą zabudowę składowisk/gleb roślinnością i ograniczenie wtórnego rozprzestrzeniania się toksycznych pierwiastków**. Jak wykazano w pracy ***Stuczyński i in., (2007; I.B.4)***, metoda fitostabilizacji zastosowana na składowisku odpadów pohutniczych w Piekarach Śląskich, oparta na łącznym stosowaniu dużych dawek osadów ściekowych i wapna odpadowego zapewniła wieloletnią rekultywację składowiska. Zastosowane podejście zapewniło również ograniczenie wymywania metali z wodą opadową, na skutek drastycznego spadku rozpuszczalności metali, mierzonej za pomocą ekstrakcji w wodzie (średnio 10-krotny spadek rozpuszczalności Zn i nawet 50-krotny spadek rozpuszczalności Cd) (***Stuczyński i in., 2007, nr 4 osiągnięcia; I.B.4***).

Na glebie poligonowej jedynie zastosowanie kompostu zapewniło wzrost kostrzewy trzcinowej bez objawów toksyczności i ograniczenia plonu biomasy. Kompost był pod tym względem znacznie bardziej skuteczny niż samodzielnie stosowane w dużych dawkach nawóz fosforowy i wapno. Dodatek kompostu z wapnem również w największym stopniu ograniczył zawartość Zn, Cd i Pb w roślinach a rozpuszczalność metali w 0,01M azotanie strontu ograniczył do bezpiecznego poziomu. **Stosowanie materiałów organicznych, szczególnie bogatych w Fe i P, w dużych dawkach (200-300 ton suchej masy na hektar) stanowi zatem rozwiązanie o bardzo dużym potencjale praktycznym do wykorzystania na glebach ekstremalnie zanieczyszczonych Zn, Cd i Pb, niezależnie od źródła zanieczyszczenia**. Oczywiście, niezależnie od tego uogólnienia, wymagane jest indywidualne podejście do każdego obiektu, polegające na rozpoznaniu poziomu zanieczyszczenia, określenia jakie pierwiastki stanowią główny problem, oraz oceny stanu właściwości gleb, w tym odczynu.

W moich badaniach **wykazano również, że aby zapewnić skuteczność fitostabilizacji, przy dużych dawkach materiałów organicznych (osady ściekowe, komposty) należy równolegle stosować wapnowanie, tak aby utrzymać odczyn gleby w zakresie alkalicznym.** W doświadczeniu opisanym w pracy ***Siebielec i Chaney (2012; nr 5 osiągnięcia; I.B.5)*** wprawdzie zastosowanie kompostu bez wapna zapewniło wysoki plon biomasy kostrzewy, jednak zawartości Zn, Pb i Cd w roślinach były znacznie wyższe niż w przypadku łącznego stosowania kompostu i węglanu wapnia (dla przykładu Zn, odpowiednio 357 i 158 mg kg^{-1}). Również rozpuszczalność tych metali w azotanie strontu była przy samodzielnym zastosowaniu kompostu wyższa niż w wariancie kompost + węglan wapnia (dla Zn, odpowiednio 5,65 i 0,55 mg kg^{-1}), a nawet wyższa niż przy zastosowaniu samego wapna. **Stosowanie sorbenta organicznego bez zadbania o ustabilizowanie odczynu nie zapewnia zatem efektywnego ograniczenia rozprzestrzeniania się metali. Przy zastosowaniu dużych dawek osadu ściekowego lub kompostu, procesy mineralizacji materii organicznej mogą generować wtórne zjawisko spadku pH gleby, a w konsekwencji wtórnego uruchomienia metali, takich jak Zn i Cd. Stad wynika konieczność wspomagania aplikacji materiałów organicznych poprzez zastosowanie wapna w dawkach pozwalających na utrzymanie pH w zakresie alkalicznym.**

Obserwacje te zostały potwierdzone w badaniach opisywanych w pracy ***Siebielec i in. (2015, nr 6 osiągnięcia; I.B.6***). W doświadczeniu kolumnowym badano wpływ różnych sorbentów na wymywanie metali z gleby. O ile po zastosowaniu do gleby kompostu z Zabrza, który charakteryzował się alkalicznym odczynem, zaobserwowano spadek wymywania Cd i Pb, to po aplikacji kompostu z Piły oraz osadu ściekowego z Bełchatowa bez jednoczesnego dodatku wapna, nastąpiło uruchomienie i zwiększone wymywanie Cd i Pb w porównaniu z kontrolą.

Zaobserwowana w opisanych powyżej badaniach skuteczność bogatych w tlenki Fe osadów ściekowych i kompostów, wywołała zainteresowanie innymi odpadami o wyższej zawartości żelaza lub manganu (Mn), głównie w amorficznej formie. Tlenek żelaza dodany do gleby w pracy ***Siebielec i in. (2015, nr 6 osiągnięcia; I.B.6)*** drastycznie zmniejszał wymywanie Cd i Pb z gleby w porównaniu z glebą kontrolną i większością innych sorbentów testowanych w doświadczeniu. **Odpady zawierające tlenki żelaza, dostępne w skali praktycznej, takie jak odpady z oczyszczania wody pitnej, mogą zatem stanowić cenne uzupełnienie sorbentów organicznych w procesach wspomaganej stabilizacji silnie zanieczyszczonych gleb**.

W innych badaniach nie ujętych w głównym osiągnięciu, we współpracy z naukowcami z Niemiec, przetestowałem dwa typy odpadów z instalacji oczyszczania wody pitnej – jeden z nich był bogaty w tlenki Fe (zawartość Fe 35%) a drugi bogaty w tlenki Mn (zawartość Mn > 7%) (***Neu i in., 2017; II.A.18***). Zostały one zastosowane w doświadczeniu wazonowym na glebie silnie zanieczyszczonej Pb i As, oraz średnio zanieczyszczonej Cd i Zn w dawkach równych 0,5 i 1% masy gleby. Odpad bogaty w tlenki Fe bardzo wyraźnie obniżył rozpuszczalność As a oba odpady, choć w mniejszym stopniu, rozpuszczalność Cd i Zn, szczególnie przy zastosowaniu dawki 1% odpadu.

Należy zaznaczyć, że skuteczność fitostabilizacji może być uzależniona od dodatkowych czynników, takich jak ewentualne deficyty mikroelementów wywołane zastosowaniem sorbentów lub wapnowania gleby. W publikacji ***Siebielec i Chaney (2012; nr 2 osiągnięcia; I.B.2)*** wykazano, że wapnowanie gleb zanieczyszczonych niklem powoduje drastyczny spadek rozpuszczalności i fitodostępności manganu, co mogło ograniczyć efektywność zastosowanego podejścia remediacyjnego. Z kolei zastosowanie nawożenia manganem, w łatwo przyswajalnej formie siarczanu manganu, w pełni zapobiegało wystąpieniu deficytów Mn u roślin. Podobne zjawiska zaobserwowano w pracy ***Siebielec i Chaney (2012; nr 5 osiągnięcia; I.B.5)***. Ponadto udowodniono, że ekstrakcja w azotanie strontu może jednocześnie przewidywać fitodostępność pierwiastków pod kątem ich toksyczności (Ni) i ich niedoborów mikroelementów (Mn), co dodatkowo wzbogaciło dotychczasową wiedzę pod kątem celu nr I opisywanych badań.

III. Ocena wpływu najbardziej skutecznych sorbentów na biodostępność metali

Wprawdzie obecne przepisy wprowadzające pojęcie remediacji gleb nie mówią wprost o biodostępności zanieczyszczeń a raczej o ich rozprzestrzenianiu się, to jednak ograniczenie biodostępności ma kluczowe znaczenie dla zmniejszenia ryzyka związanego z

zanieczyszczeniem. Pod pojęciem biodostępności pierwiastków najczęściej rozumie się pulę lub frakcję zawartości danego pierwiastka, która może oddziaływać na dany receptor biologiczny (Geebelen i in. 2003). Jako receptory oddziaływania można brać pod uwagę człowieka lub zwierzęta w wyniku bezpośredniego oddziaływania lub poprzez łańcuch pokarmowy, organizmy glebowe lub mikroorganizmy.

Terminem, który określa szczególną formę biodostępności PTPŚ jest *„in vitro bioaccessibility"*, przez który rozumie się dostępność biologiczną pierwiastka w przewodzie pokarmowym człowieka, a szczególnie dzieci. Pojęcie to nie doczekało się jeszcze oficjalnego odpowiednika w języku polskim, najbliżej tego pojęcia jest zapewne termin „bioprzyswajalności PTPŚ".

Bezpośrednie badania efektywności remediacji gleb w zakresie ograniczania biodostępności i bioprzyswajalności PTPŚ dla człowieka i zwierząt kręgowych były dotychczas niezwykle rzadkie, zarówno w kraju, jak i na świecie. Ocenę bioprzyswajalności PTPŚ przeprowadza się za pomocą ekstrakcji w warunkach imitujących środowisko przewodu pokarmowego ssaków. Metody te zostały zwalidowane w doświadczeniach żywieniowych. Dotychczas metody in vitro stosowano pod kątem ich optymalizacji w kierunku przewidywania rzeczywistej bioprzyswajalności pierwiastków w glebach. Bardzo nieliczne były prace określające wpływ sorbentów na bioprzyswajalność PTPŚ i z reguły porównywały one jedynie skutek różnych form nawozów fosforowych (Tang i in., 2004; Bosso i in., 2008). Brown i in. (2004) wykazali, że superfosfat potrójny w największym stopniu, spośród różnych sorbentów, redukował bioprzyswajalność Pb, jednak efekt ten w dużym stopniu wiązał się z drastycznym obniżeniem pH po zastosowaniu wysokich dawek nawozów, co musiało skutkować jednoczesnym uruchomieniem fitotoksycznego Zn, poddając pod wątpliwość skuteczność fitostabilizacji skażonej gleby.

W badaniach opisanych w pracy ***Siebielec i Chaney (2012, nr 5 osiągnięcia; I.B.5)*** **udowodniono, że kombinacje sorbentów, które zapewniały najlepszy rozwój roślin i największe ograniczenie rozpuszczalności metali (co decyduje o przydatności do fitostabilizacji), skutkowały również największą redukcją bioprzyswajalności toksycznego ołowiu.** Zastosowanie bogatego w Fe i P kompostu w połączeniu z wapnem ograniczyło bioprzyswajalność Pb z ponad 30 do 20% całkowitej zawartości pierwiastka, co przewyższało efekt indywidualnego zastosowania wapna, fosforanów lub kompostu bez wapna. **Jest to pierwsza ze znanych mi prac naukowych, która przedstawiała efektywność różnych sorbentów, w tym kombinacji kompostu i wapna, w ograniczaniu bioprzyswajalności Pb, we właściwym przy remediacji zakresie odczynu gleb.**

Doświadczenia żywieniowe w celu porównania sorbentów pod kątem ograniczania biodostępności PTPŚ są niezwykle nieliczne, głównie z uwagi na koszt i znaczne wymagania organizacyjne towarzyszące takim eksperymentom. Brown i in. (2004) zaobserwowali pozytywny wpływ superfosfatu na ograniczenie akumulacji Pb w organizmach szczurów, karmionych glebą z dodatkiem różnych sorbentów. W publikacji ***Stuczyński i in. (2007; nr 4 osiągnięcia; I.B.4)*** przedstawiono wyniki doświadczenia żywieniowego, w którym młode bydło karmiono sianem zebranym z opisywanego wcześniej obiektu pilotażowego w Piekarach Śląskich, zrekultywowanego poprzez zastosowanie osadów ściekowych i wapna

odpadowego. Doświadczenie w przekonujący sposób wykazało, że zwierzęta karmione sianem ze zrekultywowanej hałdy nie akumulowały więcej Pb i Cd w mięsie niż osobniki karmione sianem kontrolnym z niezanieczyszczonego terenu. **Badania te udowodniły, że przyrodnicze zagospodarowanie nawet tak toksycznego składowiska nie powoduje wtórnego ryzyka dla dzikich zwierząt i łańcucha pokarmowego, co stanowi niezaprzeczalne osiągnięcie naukowe. Według mojej wiedzy, jak dotychczas jest to wciąż jedyne tego typu doświadczenie żywieniowe na świecie.**

Określanie reakcji mikroorganizmów jako receptora oddziaływania metali w reakcji na zastosowanie sorbentów jest również niezwykle ważne z perspektywy skuteczności wspomaganej fitostabilizacji. Można zakładać, że ograniczenie biodostępności PTPŚ ma pozytywny skutek na aktywność mikroorganizmów i procesy przemian materii organicznej i składników nawozowych przeprowadzanych przez mikroorganizmy. Większa aktywność mikroorganizmów sprzyja również odporności roślin na zanieczyszczenia, gdyż istnieje wiele mechanizmów wspomagania fitostabilizacji zanieczyszczonych gleb przez mikroorganizmy (Weyens i in., 2009, Kidd i in., 2017). Bakterie ryzosferowe promujące wzrost roślin (tzw. Plant Growth Promoting Rhizobacteria- PGPR) mogą wspomagać wzrost roślin poprzez produkcję fitohormonów, takich jak kwas indolooctowy (IAA)), hamowanie produkcji etylenu w warunkach stresu (z uwagi na aktywność deaminazy ACC) lub uwalnianie niezbędnych składników odżywczych. Mogą także modyfikować biodostępność zanieczyszczeń poprzez ich biologiczną transformację (Sessitsch i in., 2013).

Parametry mikrobiologiczne i biochemiczne nie były dotychczas powszechnie stosowane w ocenach skuteczności remediacji, zarówno w doświadczeniach szklarniowych, jak i pilotażowych eksperymentach polowych. W artykule ***Stuczyński i in. (2007; nr 4 osiągnięcia; I.B.4)*** wykazano brak zależności aktywności enzymatycznej podłoża od rozpuszczalności metali, co w zasadzie wskazuje na brak toksyczności metali dla procesów mikrobiologicznych na obiekcie zrekultywowanym poprzez zastosowanie osadu ściekowego i wapna. Aktywność enzymatyczna w największym stopniu zależała od zawartości materii organicznej oraz przyswajalnych składników pokarmowych (P, K). Aktywności takich enzymów, jak ureaza, fosfatazy czy dehydrogenazy na zrekultywowanym składowisku była ponadto na poziomie podobnym do obserwowanego w glebach użytkowanych rolniczo w tym rejonie.

Z kolei w artykule *S.**Siebielec i in. (2018; nr 7 osiągnięcia; I.B.7)*** dokonano szczegółowej oceny aktywności enzymatycznej oraz liczebności mikroorganizmów na zrekultywowanym składowisku żużli pohutniczych w zależności od zastosowanych dawek osadu ściekowego i wapna. Na obszarze, na którym zastosowano kombinacje osadu ściekowego i wapna stwierdzono istotnie wyższą aktywność enzymów (dehydrogenazy, fosfatazy) oraz ogólną liczebność bakterii, w porównaniu do obszaru kontrolnego lub zrekultywowanego osadem ściekowym bez wapna. **Kombinacja osadu i wapna sprzyjała również rozwojowi bakterii wiążących azot (Azotobacter) oraz bakterii amonifikacyjnych, które są odpowiedzialne za przemiany azotu organicznego z resztek roślinnych do formy amonowej. W sztucznie wytworzonych ekosystemach zrekultywowanych składowisk, aktywność tych grup mikroorganizmów jest szczególnie istotna, gdyż obiekty te nie są w założeniu systematycznie nawożone azotem.**

W publikacji ***Siebielec i in. (2015; nr 6 osiągnięcia; I.B.6)*** dokonałem przeglądu literatury, z odwołaniem do własnych badań, w zakresie kształtowania biodostępności metali przez nieorganiczne i organiczne sorbenty bogate fosfor. W pracy tej zawarto **wyczerpujący przegląd sorbentów dostępnych w skali praktycznej oraz ich wpływu na rozpuszczalność i fitodostępność pierwiastków śladowych, ich wymywanie z gleb, bioakumulację w organizmach glebowych, bioprzyswajalność oraz akumulację w organizmach zwierząt**. Przegląd światowych badań w zakresie wpływu sorbentów na biodostępność PTPŚ, z wyjaśnieniem mechanizmów obserwowanych zjawisk, poparto przykładami zastosowań w skali praktycznej (polowej). Ponadto dokonano ocena ryzyka związanego ze stosowaniem sorbentów organicznych i nieorganicznych bogatych w fosfor.

IV. Określenie trwałości fitostabilizacji silnie zanieczyszczonych gruntów

Trwałość efektu fitostabilizacji jest kluczowa dla powodzenia zabiegów remediacyjnych. Z uwagi na specyficzny charakter użytkowania gruntu, optymalnym rozwiązaniem jest zapewnienie trwałego efektu przy minimalnej ilości zabiegów, szczególnie w kolejnych latach po wykonaniu remediacji. Ilość prac opisujących trwałość fitostabilizacji zanieczyszczonych gleb i składowisk odpadów pohutniczych w skali polowej jest bardzo nieliczna. Fakt ten wiąże się z ograniczoną liczbą obiektów oraz ograniczonym w czasie finansowaniem badań naukowych. W publikacji ***Stuczyński i in. (2007; nr 4 osiągnięcia; I.B.4)*** opisano kilkuletni efekt wspomaganej fitostabilizacji składowiska żużli z hutnictwa cynku i ołowiu w Piekarach Śląskich, zagospodarowanego poprzez zastosowanie wysokich dawek osadu ściekowego i wapna, po którym nastąpiło wysianie wyselekcjonowanej, odpornej na zanieczyszczenie mieszanki traw. Zastosowanie osadu ściekowego i wapna spowodowało zdecydowaną redukcję rozpuszczalności w wodzie fitotoksycznego Zn oraz Cd i Pb, które są toksyczne dla organizmów żywych, szczególnie od 2 roku po wykonaniu zabiegów. Rozpuszczalność tych metali pozostawała w kolejnych latach (3-5 rok po zabiegach) na zbliżonym, dość niskim poziomie, najprawdopodobniej nietoksycznym dla roślin. Odczyn gleb pozostawał w zakresie alkalicznym, zapewniając niską rozpuszczalność metali. Analizy biochemiczne (enzymy glebowe) wykonane 5 lat po przeprowadzeniu przyrodniczej zabudowy składowiska, wykazały, że zastosowana metoda zapewniała wysoką intensywność procesów biologicznych w podłożu, wspomagających rozwój pokrywy roślinnej. Poprzez kilka lat po wykonaniu zabiegów pokrywa roślinna była zadowalająca i pokrywała niemal 100% powierzchni, niezależnie od typu zdeponowanego odpadu (powierzchnia pola doświadczalnego była podzielona na 2 części reprezentujące odpad z procesów Waeltza i Doerschla). Wielkość biomasy roślin w poszczególnych latach w większym stopniu zależała od wysokości opadów w danym roku niż poziomu rozpuszczalności metali.

Najnowsza praca *S.**Siebielec i in. (2018; nr 7 osiągnięcia; I.B.7)*** charakteryzuje podobny obiekt w Piekarach Śląskich zrekultywowany w 1996 roku, na którym w skali pilotażowej, na powierzchni 0,4 ha testowano efektywność różnych dawek osadu i wapna. **Badania te stanowią unikalną w skali światowej ocenę trwałości fitostabilizacji ze względu na skalę doświadczenia, zakres ocenianych parametrów oraz wieloletni**

charakter badań. Po 20 latach po przeprowadzeniu zabiegów fitostabilizacji, składowisko było w pełni pokryte trwałą roślinnością, częściowo pochodzącą z oryginalnej mieszanki traw, a częściowo z naturalnej sukcesji. Badania dostarczyły unikalnych informacji na temat, jakie gatunki spośród oryginalnie wysianych traw zapewniają trwałą pokrywę roślinną po 20 latach. W pokrywie roślinnej w 2016 r. spośród traw wciąż występowały wysiane *Festuca rubra* L., *Poa pratensis* L., *Festuca arundinacea* L., *Festuca ovina* L., *Agrostis capillaris* L., a także spontaniczny gatunek *Calamagrostis epigeios* L.

Badania, w których tak szczegółowo scharakteryzowano różnorodność gatunkową roślin po 20 latach od momentu wykonaniu zabudowy składowiska nie mają odpowiednika w skali światowej. Jest to jedyny tak szeroko zbadany wieloletni obiekt tego typu na świecie. W badaniach rozpoznano, jakie spontaniczne gatunki roślin występowały najliczniej w pokrywie glebowej, wspomagając procesy stabilizacji składowiska. W centrum zainteresowań badawczych były również rośliny bobowate wiążące azot, przy cym na składowisku rozpoznano tylko jeden gatunek tej rodziny - *Vicia cracca*. Roślinność spontaniczna jest o tyle istotna na tego typu zrekultywowanym składowisku, że w założeniu kolejne ingerencje człowieka w obiekt nie są przewidywane. **Badania udokumentowały, że kombinacje osadu i wapna zapewniają najbardziej zwartą pokrywę roślinną, a zatem również odporność na erozję i wymywanie metali. Z kolei zastosowanie osadu ściekowego bez wapna nie zapewniało pełnego pokrycia powierzchni roślinnością.**

W zakresie aktywności i liczebności mikroorganizmów, w tym bakterii odpowiedzialnych za kształtowaniu obiegu azotu, badania przyniosły potwierdzenie korzystnego wpływu wybranej metody fitostabilizacji, tym razem w skali wieloletniej. Badania wykazały również, że rozpuszczalność metali po 20 latach po aplikacji osadu i wapna pozostaje na niskim poziomie, zatem zastosowana technologia zapewniła trwałe ograniczenie ryzyka zjawisk toksyczności dla roślin oraz wymywania metali ze składowiska.

Podsumowanie

Do najważniejszych osiągnięć ww. prac zaliczam:

- Określenie metod oceny potrzeb remediacji gleb zanieczyszczonych pierwiastkami śladowymi.
- Udokumentowanie efektywności organicznych dodatków do gleb, bogatych w fosfor i żelazo, w procesach fotostabilizacji zanieczyszczonych gleb i odpadów.
- Udokumentowanie efektywności fitostabilizacji składowisk odpadów pohutniczych przy wykorzystaniu osadu ściekowego i wapna.
- Udowodnienie trwałego charakteru fitostabilizacji składowisk odpadów pohutniczych za pomocą osadu ściekowego i wapna.
- Dokonanie oceny bioróżnorodności zrekultywowanego składowiska odpadów pohutniczych w skali wieloletniej.

- Wykazanie potrzeby wapnowania gleb zanieczyszczonych w przypadku stosowania sorbentów organicznych.
- Dokonanie przeglądu światowych badań w zakresie wpływu sorbentów na biodostępność metali.

Wykorzystanie wyników badań

Badania wchodzące w skład osiągnięcia naukowego mają wysoką wartość naukową poprzez fakt, że we wszechstronny sposób dokumentują oddziaływanie najbardziej efektywnych sorbentów we wspomaganej fitostabilizacji gleb i składowisk zanieczyszczonych metalami. Efektywność sorbentów badano bowiem poprzez skutki dla rozpuszczalności i wymywalności metali, rozwoju roślin, aktywności i liczebności mikroorganizmów, bioprzyswajalności metali, różnorodności botanicznej.

Należy zwrócić uwagę, że prezentowane w osiągnięciu wyniki badań odnoszą się zarówno do krótkoterminowych testów, jak i do unikalnych wieloletnich danych dokumentujących trwałość fitostabilizacji wykorzystującej osady ściekowe i wapno. Unikalną naukową wartością jest podjęcie się oceny różnorodności botanicznej na wieloletnim zrekultywowanym obiekcie w Piekarach Śląskich. Można założyć, że im wyższa różnorodność botaniczna składowiska, tym większa jest odporność pokrywy roślinnej na warunki stresowe na składowisku, takie jak toksyczność metali, niedobór wody, niedobory składników nawozowych. Rozpoznanie liczebności i przynależności genetycznej bakterii biorących udział w przemianach azotu (wiązanie i mineralizacja) w wieloletnich doświadczeniach polowych ma również unikalną wartość naukową.

Badania mają również duże znaczenie praktyczne, ponieważ przeciwstawiają się tradycyjnemu podejściu opartemu na stosowaniu całkowitych zawartości w ocenie potrzeb remediacji gleb. W osiągnięciu wykazano, że metody oparte na ekstrakcji metali roztworami neutralnych soli znacznie lepiej przewidują negatywne skutki zanieczyszczenia. W glebach ciężkich i zasobnych w materię organiczną metale charakteryzują się niską mobilnością i biodostępnością, dlatego inne działania niż utrzymanie odczynu gleby na optymalnym (lekko alkalicznym) poziomie jest w zupełności wystarczające. Dalsze zabiegi i stosowanie dodatkowych sorbentów nie przyniesie zatem efektów i powodowałoby zbędne dodatkowe koszty. W takiej sytuacji zalecane są jedynie zabiegi mitygacyjne, np. dobór gatunku rośliny uprawnej lub odmiany, lub zmiana użytkowania gruntu.

Badania dostarczyły istotnych informacji na temat skuteczności poszczególnych sorbentów i ich dawek. Wiedza ta może być przydatna przy tworzeniu zaleceń do wdrażania metod fitostabilizacyjnych. Dane wieloletnie dostarczyły informacji na temat przydatności poszczególnych gatunków traw w przyrodniczej zabudowie składowisk odpadów pohutniczych, które wciąż stanowią na obszarze Górnego Śląska znaczny problem środowiskowy. Ponadto wieloletnie obserwacje obiektu w Piekarach Śląskich udowodniły, że zastosowana metoda remediacji (łączne zastosowanie osadu ściekowego i wapna oraz wysianie mieszanki traw) zapewnia trwałość fitostabilizacji składowiska, pomimo, że od momentu wykonania działań remediacyjnych w 1996r. żadne dodatkowe zabiegi (np. nawożenie) nie były wykonywane.

Literatura

Bosso S.T., J. Enzweiler, R.S. Angélica. 2008. Lead bioaccessibility in soil and mine wastes after immobilization with phosphate. Water, Air, & Soil Pollution,195:257–273.

Brown S., R. Chaney, J. Hallfrisch, J. Ryan, W. Berti. 2004. In situ soil treatments to reduce the phyto- and bioavailability of lead, zinc and cadmium. Journal of Environmental Quality 33:522–531.

Geebelen W, D.C. Adriano, D. Van der Lelie, M. Mench, R. Carleer, H. Clijsters, J. Vansgonsveld. 2003. Selected bioavailability assays to test the efficacy of amendment-induced immobilization of lead in soils. Plant and Soil 249:217–228

Kabata-Pendias A., T. Motowicka-Terelak, M. Piotrowska, H. Terelak, T. Witek. 1993. Assessment of soil and plant pollution with heavy metals and sulphur. Guidelines for agriculture. Wyd. IUNG, Puławy

Kidd P.S., V. Álvarez-López, C. Becerra-Castro, M. Cabello-Conejo, Á. Prieto-Fernández. 2017. Potential role of plant-associated bacteria in plant metal uptake and implications in phytotechnologies. In: Cuypers A, Vangronsveld J, editors. Phytoremediation, ISBN: 9780128028537, Elsevier Ltd. Academic Press, pp. 87–126.Li

Neu S., I. Müller, C. Brackhage, R. Galazka, G. Siebielec, M. Puschenreiter, E.G. Dudel. 2017. Effects of drinking water treatment residues on trace element mobility and accumulation by Triticum aestivum L. and Dendrobaena veneta in a multi-element contaminated agricultural soil. Journal of Soil and Sediments, 18(6): 2259-2270

Panagos P., M.V. Liedekerke, Y. Yigini, L. Montanarella. 2013. Contaminated sites in Europe: review of the current situation based on data collected through a European network. Journal of Environmental and Public Health. Article ID 158764

Ruby M.V., A. Davis, R. Schoof, S. Eberle, C.M. Selstone. 1996. Estimation of lead and arsenic bioavailability using a physiologically based extraction test. Environmental Science and Technology 30:422–430.

Sessitsch A., M. Kuffner, P.S. Kidd, J. Vangronsveld, W.W. Wenzel, K. Fallmann, M. Puschenreiter 2013. The role of plant-associated bacteria in the mobilization and phytoextraction of trace elements in contaminated soils. Soil Biol. Biochem. 60:182-194.

Siebielec G., R.L. Chaney. 2006. Mn fertilizer requirement to prevent Mn deficiency when liming to remediate Ni-phytotoxic soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 37: 163-179

Siebielec G., R.L. Chaney. 2012. Testing amendments for remediation of military range contaminated soil. Journal of Environmental Management, 108: 8-13

Siebielec G., R.L. Chaney, U. Kukier. 2007. Liming to remediate Ni contaminated soils with diverse properties and a wide range of Ni concentration. Plant and Soil 299: 117-130

Siebielec G., T. Stuczyński, R. Korzeniowska-Pucułek. 2006. Metal bioavailability in long term contaminated soils of Tarnowskie Gory area. Polish Journal of Environmental Studies, 15: 121-129

Siebielec G., A. Ukalska-Jaruga, P. Kidd. 2015. Bioavailability of trace elements in soils amended with high- phosphate materials. W Selim M. (Ed.): Phospate in soils. Interaction with micronutrients, radionuclides and heavy metals. CRC Press, Boca Raton, FL, p. 237-267

Siebielec S., G. Siebielec, T. Stuczyński, P. Sugier, E. Grzęda, J. Grządziel. 2018. Long term insight into biodiversity of a smelter wasteland reclaimed with biosolids and by-product lime. Science of the Total Environment, 636: 1048–1057

Stuczyński T., G. Siebielec, W. Daniels, G. McCarty, R. Chaney. 2007. Biological aspects of metal waste reclamation with biosolids. Journal of Environmental Quality, 36: 1154-1162

Tang, X., Y. Zhu, S. Chen, L. Tang, X. Chen. 2004. Assessment of the effectiveness of different phosphorus fertilizers to remediate Pb contaminated soil using in vitro test. Environment International 30:531–537.

Weyens N., D. van der Lelie, S. Taghavi, L. Newman, J. Vangronsveld. 2009. Exploiting plant–microbe partnerships to improve biomass production and remediation. Trends Biotechnol. 27:591-598.

V. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Ocena skutków przyrodniczego stosowania osadów ściekowych i innych odpadów organicznych

Istotny kierunek moich dotychczasowych badań naukowych stanowiła charakterystyka osadów ściekowych i innych odpadów organicznych oraz ocena skutków ich stosowania do nawożenia lub rekultywacji gleb. W ostatnich latach, w niektórych regionach kraju następuje przyrost powierzchni użytków rolnych, wykorzystywanych dla celów produkcji roślinnej w gospodarstwach bezinwentarzowych, a więc pozbawionych nawożenia organicznego. Z uwagi na deficyt obornika jako podstawowego źródła materii organicznej, wzrasta rola alternatywnych i dość powszechnie dostępne egzogennych źródeł materii organicznej, takich jak osady ściekowe czy pofermenty. Intensywny rozwój gospodarki, w tym modernizacja i budowa nowych oczyszczalni ścieków, a także rozbudowa sieci kanalizacyjnej, spowodowały zwiększenie produkcji osadów ściekowych w Polsce. Szczegółowej oceny wymagają jednak środowiskowe skutki stosowania rożnych osadów ściekowych i innych opadów do gleby.

W artykule ***Siebielec i Stuczyński (2008; II.D.32)*** przedstawiono najszersze, jak do tej pory, badania jakości osadów ściekowych wytwarzanych w Polsce, reprezentujących 60 rożnych komunalnych oczyszczalni ścieków. Osady przeanalizowano pod kątem zawartości węgla i składników nawozowych a także pierwiastków śladowych. Badania wykazały, że osady komunalne posiadają znaczny potencjał nawozowy (średnia zawartość materii organicznej 42%, fosforu 1,83%, azotu 2,61%). Większość osadów spełniała kryteria zawartości pierwiastków śladowych, określone dla rolniczego wykorzystania osadów. Cennym aspektem pracy było porównanie jakości osadów ściekowych wytwarzanych na przemysłowym obszarze Górnego Śląska z osadami reprezentującymi inne regiony. Co ciekawe, udział osadów produkowanych na Górnym Śląsku i spełniających kryteria zawartości metali na obszarze był podobny jak w przypadku grupy referencyjnej.

Wieloletnie skutki stosowania wysokich dawek osadów ściekowych dla plonowania roślin uprawnych i aktywności oraz liczebności mikroorganizmów, na tle nawożenia mineralnego oraz pofermentu z biogazowni rolniczej, przedstawiono w artykule ***Siebielec i in. (2018; II.A.22)***. Badania przeprowadzone na poletkach lizymetrycznych wykazały, że komunalne osady ściekowe spełniające kryteria dopuszczające do stosowania w rolnictwie, nawet w dawkach rekultywacyjnych stymulują aktywność i liczebność mikroorganizmów glebowych, szczególnie bakterii. Największy przyrost aktywności i liczebności bakterii następował w przypadku skumulowanej dawki osadu. Nawożenie gleby osadem ściekowym również pozytywnie oddziaływało na plon zbóż. Badania wykazały, że możliwe jest zwiększenie dawki osadu ściekowego dopuszczalnej w rolnictwie, bez negatywnych skutków dla plonowania roślin i aktywności mikroorganizmów glebowych, przy zachowaniu wymagań jakościowych dla osadów. Obecnie przygotowywana jest praca naukowa poświęcona jakości odcieków z poletek nawożonych osadami ściekowymi, ze szczególnym uwzględnieniem ryzyka wymywania metali, azotu i fosforu do wód gruntowych.

Z kolei potencjał rekultywacyjny osadów ściekowych został szczegółowo omówiony w publikacjach nr 4 i 7 głównego osiągnięcia.

W przeglądowym rozdziale ***S.Siebielec i in. (2015; II.D.27)*** przekrojowo omówiono zagadnienia zanieczyszczenia komunalnych osadów ściekowych pierwiastkami śladowymi, związkami organicznymi oraz ich jakości sanitarnej. Szeroko przedstawiono metody i technologie uzdatniania osadów ściekowych pod względem zawartości zanieczyszczeń i stanu sanitarnego. Możliwość alternatywnych zastosowań osadu ściekowego z kolei przedstawiono w artykule ***Mendez i in. (2005; II.A.5)***, w którym na podstawie badań wykonanych wspólnie z naukowcami z Hiszpanii, wykazano znaczny potencjał osadów poddanych pirolizie jako absorbentów metali z roztworów.

Z uwagi na wspominane dysproporcje pomiędzy regionami pod względem dostępności obornika i bilansu węgla w glebie, w obszarze moich zainteresowań badawczych znajdują się również inne alternatywne źródła egzogennej materii organicznej. W artykule ***Latawiec i in. (2017; II.A.17***) przeanalizowano potencjał zastosowania biowęgli do nawożenia gleb w Polsce. Analizy GIS posłużyły do zidentyfikowania obszarów, w których zastosowanie biowęgla może przynieść korzyści pod względem jakości gleb. Okazało się, że 21,8% gruntów rolnych w Polsce ma co najmniej umiarkowane wskazanie do wykorzystania biowęgla (zawartość materii organicznej w glebie poniżej 2% i pH poniżej 5,5). Jako bariery dla szerszego stosowania biowegla do nawożenia gleb zidentyfikowano dostępność biomasy i związane z tym ryzyko zmiany użytkowania gruntu oraz wysokie jak dotychczas koszty wytwarzania biowęgla.

Rozdziały w monografii będącej efektem nadgranicznego projektu polsko-czeskiego (***Kaczyński i in., 2015; II.D.21 oraz Kaczyński i Siebielec, 2015; II.D.22***) przedstawiają badania wpływu rożnych źródeł egzogennej materii organicznej na właściwości chemiczne gleb oraz poziom i jakość materii organicznej. W badaniach polowych porównywano skutki stosowania kompostów, pofermentów oraz mączki zwierzęcej, na tle nawożenia mineralnego. Wykazano, że w dłuższej perspektywie czasowej testowane materiały mogą stanowić cenne źródło węgla w glebie, natomiast w krótszej perspektywie czasu nie oddziałują negatywnie na jakość węgla i ryzyko zjawisk erozji gleb. Wpływały one pozytywnie na wysokość plonu oraz nie powodowały akumulacji zanieczyszczeń nieorganicznych i organicznych w glebie.

Z uwagi na fakt, że osady denne usuwane są jedynie w przypadkach nadmiernego wypłycania się jezior, zbiorników lub w razie potrzeby udrożnienia rzek, problem bezpiecznego zagospodarowania osadów jest niedoceniony. W związku z tym badania nad sposobami zagospodarowania osadów dennych są nieliczne oraz brak jest dedykowanych temu zagadnieniu regulacji prawnych. Jednak potencjalnie osady denne mogą być zagospodarowywane w rekultywacji gleb, jednak takie wykorzystanie osadów może odbywać się jedynie w bezpieczny środowiskowo sposób. Zagadnienia jakości osadów dennych oraz możliwości ich przyrodniczego wykorzystania są niemal nierozpoznane. W rozdziale przeglądowym ***S.Siebielec i in. (2015; II.D.26)*** przedstawiono poziom i zróżnicowanie zanieczyszczenia osadów dennych na podstawie badań monitoringowych, prowadzonych przez Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, również w układzie przestrzennym, przedstawiając mapy miejsc pobrania próbek osadów dennych, w których stwierdzono zanieczyszczenie wg kryteriów geochemicznych. Wykazano dużą zmienność zawartości pierwiastków śladowych i zanieczyszczeń organicznych w osadach jezior, również zmienność przestrzenną i sezonową w obrębie tego samego obiektu. W przypadku rzek, jakość osadów dennych w dużej mierze zależy od wielkości koryta rzeki, terenu przez jaki przepływa oraz charakteru zlewni.

Kaczyński R., G. Siebielec. 2015. Wpływ egzogennej materii organicznej na poziom i jakość glebowej materii organicznej. W: Maly S., G. Siebielec (Ed.) Badania egzogennej materii organicznej w celu bezpiecznego stosowania do gleby. UKZUZ, Brno, Rep. Czeska, s. 31-38

Kaczyński R., P. Kosubova, R. Gałązka, G. Siebielec. 2015. Wpływ egzogennej materii organicznej na właściwości chemiczne gleby. W: Maly S., G. Siebielec (Ed.) Badania egzogennej materii organicznej w celu bezpiecznego stosowania do gleby. UKZUZ, Brno, Rep. Czeska, s. 39-66

Latawiec A.E., H. Baxter, G. Cornelissen, S. Hale, J. Krolczyk, M. Kubon, A. Lopatka, A. Medynska-Juraszek, L. Peake, B. Reid, G. Siebielec, S. Sohi, Z. Spiak, B. Strassburg. 2017. A Reconnaissance-scale GIS-based multicriteria decision analysis to support sustainable biochar use: Poland as a case study. Journal of Environmental Engineering and Landscape Management, 25(02): 208-222

Méndez A., G. Gascó, M. Freitas, G. Siebielec, T. Stuczynski, L. Figueiredo. 2005. Preparation of carbon-based adsorbents from pyrolysis and air activation of sewage sludges. Chemical Engineering Journal, 108 (1-2): 169-177

Siebielec G., S. Siebielec, D. Lipski. 2018. Long-term impact of sewage sludge, digestate and mineral fertilizers on plant yield and soil biological activity. Journal of Cleaner Production, 187: 372-379

Siebielec G., T. Stuczynski. 2008. Metale śladowe w komunalnych osadach ściekowych wytwarzanych w Polsce. Proceedings of ECOpole, 2008, Vol. 2, No. 2, s. 479-484

Siebielec S., G. Siebielec, B. Smreczak 2015. Zanieczyszczenia osadów dennych rzek i zbiorników wodnych. Studia i Raporty IUNG-PIB, 46(20): 163-183

Siebielec S., M. Urbaniak, G. Siebielec. 2015. Zanieczyszczenia i metody uzdatniania komunalnych osadów ściekowych. Studia i Raporty IUNG-PIB, 46(20): 45-65

Zagadnienia wpływu urbanizacji na zasoby glebowe

W obszarze moich zainteresowań badawczych znajduje się wpływ procesów urbanizacyjnych na zasoby, jakość i funkcje gleb. Zagadnienia te są słabo rozpoznane zarówno na poziomie europejskim, jaki i krajowym. Rozdział ***Siebielec i in. (2015; II.D.25)***, opublikowany w monografii wydanej jako raport JRC, zawiera obszerny przegląd pojęć związanych z wpływem urbanizacji na zasoby glebowe, opisuje skalę zasklepiania gleb i przekształceń użytków rolnych na cele nierolne w Europie, wskazując na niezrównoważony przyrost obszarów zasklepionych i utratę gruntów rolnych w odniesieniu do przyrostu populacji. W rozdziale tym omówiłem również przyczyny i siły sprawcze zasklepiania gleb, wskaźniki jakie mogą być przydatne przy ocenie skali wpływu urbanizacji na jakości i funkcje gleb, źródła danych do oceny wpływu urbanizacji, a także interakcje zasklepiania gleb z innymi przejawami degradacji gleb. Ponadto omawiany jest wpływ zasklepiania i przyrostu powierzchni sztucznych na funkcje produkcyjne, środowiskowe, społeczne i ekonomiczne gruntów, co jest niezwykle rzadko omawianym dotychczas zagadnieniem. W rozdziale podkreślono, że zrozumienie skali presji urbanizacyjnej na funkcje gleby i ich usługi ekosystemowe ma zasadnicze znaczenie dla włączenia zagadnień ochrony gleby w rozwój przestrzenny. Ponadto istnieje ciągła potrzeba budowania baz danych charakteryzujących jakość gleb oraz skalę zasklepiania gleb, które w połączeniu z przekonującymi wskaźnikami mogą być wykorzystywane do zrównoważonego planowania przestrzennego. Podkreślono również, że budowanie świadomości całego społeczeństwa co do potrzeby ochrony gleby przed zasklepianiem ma kluczowe znaczenie dla wdrażania zrównoważonych strategii rozwoju obszarów miejskich.

Raport przygotowany w ramach międzynarodowego projektu Urban Soil Management Strategy jest z kolei unikalnym przewodnikiem dla praktyków zajmujących się rozwojem miast, opisującym funkcje gleb i istotne właściwości gleb, a przede wszystkim zabiegi pozwalające na podwyższenie zdolności gleby do pełnienia określonych funkcji, jako mechanizmu kompensacji utraty gleb w procesach urbanizacji (***Siebielec i in., 2011; II.E.18***). Wśród opisywanych zabiegów znalazły się techniki usuwania zasklepiania, usuwania zanieczyszczeń z gleby, rekultywacja gleb, nawadnianie, ekstensyfikacja użytkowania, ochrona przed erozją, wapnowanie, itd., wraz z informacją, jakie funkcje gleb są poprawiane przez poszczególne zabiegi. Przewodnik tego typu może być również wskazówką na jakie cele przeznaczać środki pozyskiwane z opłat za przekształcenia użytków rolnych na cele nierolne.

W rozdziale ***S.Siebielec i in. (2017; II.D.33)*** przestawiono skalę przekształceń użytków rolnych w Polsce na cele nierolne, w odniesieniu do jakości gleb. Szczególną uwagę zwrócono na fakt, że znaczny udział (około 50%) w całkowitej powierzchni przekształcanej

rocznie na cele nierolne, stanowią grunty najbardziej cennych klas I-III, które decydują o potencjale produkcyjnym polskiego rolnictwa a w dalszej perspektywie czasu o bezpieczeństwie żywnościowym kraju. Fakt ten świadczy o tym, że zagadnienia glebowe są w dalece niewystarczający sposób brane pod uwagę w rozwoju urbanizacyjnym kraju.

Siebielec G., S. Lazar, C. Kaufmann, S. Jaensch. 2011. Handbook for measures enhancing soil function performance and compensating soil loss during urbanization process. Urban SMS project: Deliverable number: 6.1.4, ss.37

Siebielec G., G. Prokop, H. van Delden, S. Verzandvoort, T. Miturski, A. Łopatka. 2015. Soil sealing. W: Stolte J. et al. Soil threats in Europe. Status, methods, drivers and effects on ecosystem services. JRC Technical Reports. European Union, ISBN 978-92-79-54018-9, s. 79-91

Siebielec S., J. Strzelecka, G. Siebielec. 2017. Skala przekształceń użytków rolnych w Polsce na cele nierolne. W: Monografia - Badania i Rozwój Młodych Naukowców w Polsce – Nauki przyrodnicze, ss.130-137, ISBN 978-83-65362-48-3.

Ocena i monitorowanie jakości gleb na poziomie regionalnym i krajowym

Znaczną część mojej aktywności naukowo-badawczej stanowiły dotychczas prace dotyczące monitorowania i oceny jakości gleb w skali regionalnej i krajowej. Prace te miały zarówno naukowy, jak i w przeważającej części wdrożeniowy charakter, ponieważ były przygotowywane dla administracji krajowej, regionalnej lub Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska. Od roku 2010 koordynuję krajowy monitoring chemizmu gleb ornych Polski, czego efektem była wydana w 2012 roku monografia „Monitoring chemizmu gleb ornych w Polsce w latach 2010-2012" (***Siebielec i in., 2012; II.D.14***). Praca ta podsumowuje 4 edycje badań monitoringowych (od 1995 r.) oraz szczegółowo omawia właściwości gleb pod kątem jakości gleb i obserwowanych trendów. W nieco skróconej wersji krajowe badania monitoringowe zostały przedstawione w rozdziale Studiów i Raportów IUNG-PIB (***Siebielec, 2017; II.D.32***). Z kolei ocena wyników badań 5 edycji monitoringu (2015-2017) została zawarta w raporcie dostępnym publicznie na stronach internetowych GIOŚ http://www.gios.gov.pl/images/dokumenty/pms/monitoring_jakosci_gleb/Raport_MChG_etap3.pdf. Raport zawiera ocenę wyników pozyskanych w ostatniej edycji monitoringu wraz z oceną kierunków zmian jakości gleb na przestrzeni 20 lat, co powoduje, że badania monitoringowe w Polsce mają niewiele odpowiedników w Europie, pod względem zakresu badań i ich skali czasowej. Do najistotniejszych osiągnięć wynikających z badań i analizy danych monitoringowych należą: (1) ocena wieloletnich kierunków zmian zawartości materii organicznej, (2) wykazanie postępującego trendu zakwaszania gleb użytkowanych rolniczo, (3) ocena regionalnej zmienności zasobności gleb w węgiel, składniki nawozowe, odczyn, (4) udokumentowanie deficytowych poziomów siarki w glebach, (5) określenie poziomów zawartości poszczególnych wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych, (6) pierwsza w kraju ocena zanieczyszczenia gleb arsenem i rtęcią na poziomie krajowym, (7) pierwsza w kraju ocena stopnia zanieczyszczenia gleb pestycydami chloroorganicznymi.

W skali regionalnej opracowywałem szczegółowe analizy stanu i zmian jakości gleb w województwie dolnośląskim w odpowiedzi na potrzeby administracji regionalnej (***Siebielec i Stuczyński, 2007; II.D.7; Siebielec i in., 2007; II.D.8; Siebielec i in., 2007; II.D.9***). Opracowanie to było dla administracji cennym źródłem informacji dla określenia potrzeb działań w zakresie ochrony obszarów wiejskich i użytków rolnych oraz oceny efektywności programów ochrony gleb (np. regionalny program wapnowania gleb), które wiązały się z wydatkowaniem znacznych środków ze źródeł publicznych.

W rozdziale ***Siebielec i in. (2008; II.D.13)*** przedstawiłem warunki produkcji rolniczej na obszarach o dużym udziale gleb zanieczyszczonych metalami. W publikacji przedstawiono potencjalne skutki zanieczyszczenia gleb dla produkcji rolniczej, z uwzględnieniem ryzyka dla człowieka, jakości plonów oraz procesów biologicznych w glebie, omówiono skalę zanieczyszczenia gleb w Polsce oraz scharakteryzowano produkcję rolniczą na terenach zanieczyszczonych. Zwrócono uwagę na znaczny udział gleb kwaśnych w niektórych gminach posiadających zanieczyszczone gleby, co zwiększa ryzyko migracji potencjalnie toksycznych pierwiastków do łańcucha pokarmowego. W podsumowaniu zwrócono uwagę na fakt, że dla ograniczenia ryzyka związanego z występowaniem gleb zanieczyszczonych na użytkach rolnych niezbędne jest wprowadzenie, oprócz zabiegów wapnowania, właściwej praktyki rolniczej uwzględniającej odpowiedni dobór odmian i nawozów. Dla przykładu występuje duże zróżnicowanie nagromadzenia kadmu w ziarnie pszenicy w zależności od jej odmiany oraz formy nawozu potasowego. Ponadto celowa byłaby zmiana struktury zasiewów w kierunku zmniejszenia udziału pszenicy na korzyść innych gatunków zbóż.

W publikacji ***Kozyra i Siebielec (2014; II.D.16)***, wydanej w ramach prestiżowej serii Raportów o stanie wsi, scharakteryzowano stan środowiska przyrodniczego na obszarów wiejskich, przy czym mój udział dotyczył oceny jakości gleb oraz największych zagrożeń dla ich stanu i funkcji. W szczególności zwrócono uwagę na pogłębiający się problem zakwaszenia gleb, niski poziom stosowania wapna do odkwaszania gleb, duży udział zbóż w strukturze zasiewów, dysproporcję regionalną pod względem dostępności nawozów naturalnych oraz przekształcanie gleb z dużym potencjałem produkcyjnym na cele nierolne.

Spośród prac o charakterze wdrożeniowym i dużym znaczeniu praktycznym należy przede wszystkim wymienić proces wyznaczania obszarów z ograniczeniami naturalnymi w Polsce, przeznaczonych do wsparcia z funduszy unijnych (ONW). Opis prac zawarto w raportach: ***Koza i in. (2016; II.E.33)*** oraz ***Siebielec i in. (2017; II.E.35)***. Raporty oraz dane w formacie mapowym, będące efektem zespołowej pracy, szczegółowo przedstawiają sposób adaptacji kryteriów wyznaczania obszarów z ograniczeniami naturalnymi (w nowym okresie finansowania ONW są to głównie kryteria glebowe) do warunków i dostępności danych w Polsce oraz przedstawiają przestrzenny rozkład obszarów (gmin oraz obrębów ewidencyjnych) spełniających poszczególne kryteria kwalifikacji do ONW.

Koza P., G. Siebielec, A. Łopatka, B. Smreczak, J. Niedźwiecki, J. Jadczyszyn, R. Kaczyński, E. Karkuszewska, M. Łysiak, J. Koza, E. Chabros, U. Wójtowicz, L. Poręba, B. Bartosiewicz. 2016. Sprawozdanie z realizacji III etapu (sprawozdanie końcowe) zamówienia MRiRW Ostateczne wyznaczenie obszarów z ograniczeniami naturalnymi w Polsce, nr umowy BDGzp-2125B-123/12, IUNG-PIB, ss. 108

Kozyra J., G. Siebielec. 2014. Stan środowiska przyrodniczego na obszarach wiejskich. W: Nurzyńska I., Poczta W. Polska Wieś 2014. Raport o Stanie Wsi. Fundacja na rzecz Rozwoju Polskiego Rolnictwa, Warszawa. s. 175-198

Siebielec G. 2017. Stały monitoring gleb użytków rolnych Polski. Studia i Raporty IUNG-PIB, 51(5): 57-72

Siebielec G., P. Koza, A. Łopatka, B. Smreczak, W. Guba, B. Pomianek, B. Waluto. 2017. Raport techniczny przedstawiający metodologię stosowaną do wyznaczenia obszarów z ograniczeniami naturalnymi w Polsce w oparciu o kryteria biofizyczne. Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi, Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy, ss. 70 (2 wersje - w języku polskim i angielskim)

Siebielec G., B. Smreczak, A. Klimkowicz-Pawlas, M. Kowalik, R. Kaczyński, P. Koza, A. Ukalska-Jaruga, M. Łysiak, U. Wójtowicz, L. Poręba, E. Chabros. 2017. Raport z III etapu realizacji zamówienia „Monitoring Chemizmu Gleb Ornych w Polsce w latach 2015-2017 (raport końcowy). Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, IUNG-PIB, pp. 194

Siebielec G., B. Smreczak, A. Klimkowicz-Pawlas, B. Maliszewska-Kordybach, H. Terelak, P. Koza, M. Łysiak, R. Gałązka, M. Pecio, B.Suszek, T. Miturski, B. Hryńczuk. 2012. Monitoring chemizmu gleb ornych w Polsce w latach 2010-2012. Biblioteka Monitoringu Środowiska. Warszawa, ss. 196

Siebielec G., T. Stuczyński. 2007. Wskaźniki żyzności gleb. W: Stan i zmiany właściwości gleb użytkowanych rolniczo w województwie dolnośląskim w latach 2000-2005. IUNG Puławy, 2007, s. 129-157

Siebielec G., T. Stuczyński, A. Łopatka. 2007. Charakterystyka zanieczyszczenia gleb metalami śladowymi i siarką. W: „Stan i zmiany właściwości gleb użytkowanych rolniczo w województwie dolnośląskim w latach 2000-2005. IUNG Puławy, 2007, s.198-217

Siebielec G., T. Stuczyński, R. Pudełko, P. Koza, R. Korzeniowska-Pucułek. 2007. Ocena stanu zakwaszenia gleb. W: Stan i zmiany właściwości gleb użytkowanych rolniczo w województwie dolnośląskim w latach 2000-2005. IUNG Puławy, 2007, s. 158-193

Siebielec G., T. Stuczyński, H. Terelak, K. Filipiak, P. Koza, R. Korzeniowska-Pucułek, A. Łopatka, J. Jadczyszyn. 2008. Uwarunkowania produkcji rolniczej na obszarach o znacznym udziale gleb zanieczyszczonych metalami śladowymi. Studia i Raporty PIB, 12: 114-133

Ocena zmian zawartości węgla oraz alternatywnych sposobów uzupełniania bilansu węgla w glebie

Materia organiczna posiada podstawową rolę w utrzymaniu fizycznych, chemicznych i biologicznych właściwości gleb na poziomie zapewniającym zdolność gleby do pełnienia funkcji produkcyjnych i ekologicznych. Z uwagi na fakt, że utrata materii organicznej została określona przez Komisję Europejską jako jedno z głównych zagrożeń dla gleb, oraz niektóre

wstępne badania wykazały istnienie trendu spadku zawartości substancji organicznej w niektórych regionach kraju, głównie w glebach wyjściowo zasobnych w substancję organiczną (***Stuczyński i in. 2006; II.D.6***), zagadnienia poziomu materii organicznej w glebie stanowią istotny element moich badań.

Badania statystyczne wskazują, że bilans węgla w glebie jest w wielu regionach kraju negatywny, stosując wyliczenia na podstawie struktury zasiewów, poziomu stosowania nawozów naturalnych oraz współczynników akumulacji węgla w glebie dla poszczególnych upraw. Co ciekawe, badania monitoringowe w perspektywie 15- i 20-letniej nie wykazują trendów spadku zawartości węgla w glebie na poziomie krajowym (***Siebielec i in., 2012; II.D.14; Faber i in., 2015; II.D.20***).

Unikalne dane, sprzeczne z utartymi poglądami o znacznej utracie węgla glebowego, przedstawiono w naszych badaniach w ramach unijnego projektu CANTOGETHER (***Kaczyński i in., 2017; II.A.16***). Obserwowane zmiany zawartości węgla na przestrzeni ponad 40 lat zostały wyjaśnione za pomocą statystycznych danych o rolnictwie przy wykorzystaniu modelu Roth-C. Według badań modelowych, zmiany w rolnictwie obserwowane od lat 60-tych ubiegłego stulecia wywołały przyrost zawartości węgla w glebie w większości lokalizacji w województwie dolnośląskim, szczególnie na glebach wyjściowo mało zasobnych w węgiel, co należy wiązać ze zwiększeniem intensywności produkcji, wzrostem plonów, a co za tym idzie również ilości przyorywanych resztek pożniwnych. Przyrost zawartości węgla w glebie następował nawet w obliczu spadku poziomu nawożenia obornikiem. Co istotne, wyniki badań modelowych zostały potwierdzone analizami próbek glebowych w tych samych miejscach po okresie 40 lat (profile wzorcowe map glebowo-rolniczych). W badaniach ponadto zaproponowano unikalne podejście metodyczne polegające na łączeniu przestrzennych danych glebowych i klimatycznych z danymi statystycznymi, charakteryzującymi rolnictwo, w celu modelowania wpływu rolnictwa na jakość. Fakt, że to podejście odzwierciedla rzeczywiste zmiany w rolnictwie i procesy glebowe zachodzące w rzeczywistych warunkach pola uprawnego można traktować jako zaletę tej metody w porównaniu z modelami opartymi na kontrolowanych eksperymentach polowych. Polowe badania w warunkach kontrolowanych często przeszacowują plony i ilości resztek roślinnych w porównaniu do średniej wydajności produkcji roślinnej w danym regionie.

Z uwagi na wspominany wcześniej niedobór nawozów naturalnych w wielu regionach, w centrum moich zainteresowań badawczych znajdują się potencjalne egzogenne źródła węgla glebowego, takie jak osady ściekowe, komposty, pofermenty, osady denne. Skutki stosowania różnych materiałów organicznych dla jakości gleb, plonu i jakości roślin oraz jakości biologicznej gleb, opisywano w pracach: ***Kaczyński i in., 2015; II.D.21; Kaczyński i Siebielec, 2015; II.D.22*** oraz ***Siebielec i in. 2018; II.A.22***.

Faber A., Z. Jarosz, A. Łopatka, G. Siebielec 2015. Ocena zmian zawartości węgla organicznego w glebach na podstawie danych monitoringu chemizmu gleb ornych w Polsce. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2015, 46(20), 9-20

Kaczyński R., G. Siebielec. 2015. Wpływ egzogennej materii organicznej na poziom i jakość glebowej materii organicznej. W: Maly S., G. Siebielec (Ed.) Badania egzogennej materii organicznej w celu bezpiecznego stosowania do gleby. UKZUZ, Brno, Rep. Czeska, s. 31-38

Kaczyński R., P. Kosubova, R. Gałązka, G. Siebielec. 2015. Wpływ egzogennej materii organicznej na właściwości chemiczne gleby. W: Maly S., G. Siebielec (Ed.) Badania egzogennej materii organicznej w celu bezpiecznego stosowania do gleby. UKZUZ, Brno, Rep. Czeska, s. 39-66

Kaczyński R., G. Siebielec, M.C. Hanegraaf, H. Korevaar. 2017. Modelling soil carbon trends for agriculture development scenarios at regional level. Geoderma 286: 104-115

Siebielec G., B. Smreczak, A. Klimkowicz-Pawlas, B. Maliszewska-Kordybach, H. Terelak, P. Koza, M. Łysiak, R. Gałązka, M. Pecio, B.Suszek, T. Miturski, B. Hryńczuk. 2012. Monitoring chemizmu gleb ornych w Polsce w latach 2010-2012. Biblioteka Monitoringu Środowiska. Warszawa, ss. 196

Praca zbiorowa pod red. Stuczyński T. (zespół: S.Dobers, E.Czyż, L.Gawrysiak, H.Pidvalna, H.Kukla, R.Korzeniowska-Pucułek, J.Kozyra, J.Jadczyszyn, A.Łopatka, E.Nowocień, R.Pudełko, G.Siebielec, T.Stuczyński). 2006. Wdrożenie zintegrowanego systemu informacji o rolniczej przestrzeni produkcyjnej dla potrzeb ochrony gruntów w województwie podlaskim. Urząd Marszałkowski Woj. Podl., IUNG-PIB, Puławy, pp. 240

Podsumowanie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych

Do najważniejszych osiągnięć w zakresie pozostałego dorobku naukowego należy zaliczyć:

- ocena jakości komunalnych osadów ściekowych wytwarzanych w Polsce wykonana na reprezentatywnej grupie osadów,

- ocena wieloletniego wpływu wysokich dawek osadów ściekowych na plon zbóż i aktywność mikroorganizmów glebowych na tle nawożenia mineralnego,

- podsumowanie skali zanieczyszczenia osadów dennych rzek i zbiorników wodnych,

- zintegrowanie wiedzy w zakresie sił sprawczych zasklepiania gleb, wskaźników przydatnych przy ocenie wpływu urbanizacji na jakości i funkcje gleb, źródeł danych do oceny wpływu urbanizacji, interakcji zasklepiania gleb z innymi przejawami degradacji gleb oraz wpływu zasklepiania i przyrostu powierzchni sztucznych na funkcje gleb,

- przewodnik dla praktyków w zakresie zabiegów podwyższających potencjał gleby do pełnienia określonych funkcji jako kompensacja utraty gleb w procesach urbanizacji,

- ocena wieloletnich trendów zmian jakości gleb w skali kraju,

- wyznaczenie obszarów z ograniczeniami naturalnymi w Polsce, przeznaczonych do wsparcia z funduszy unijnych (ONW),

- opracowanie unikalnego podejścia metodycznego polegającego na łączeniu przestrzennych danych glebowych i klimatycznych z danymi statystycznymi charakteryzującymi rolnictwo, w celu modelowania wpływu rolnictwa na jakość gleb,

- wykazanie związku pomiędzy zwiększeniem intensywności produkcji i wzrostem plonów na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat a przyrostem zawartości węgla w glebach o niskiej wyjściowej zawartości.

Perspektywy badawcze

W przyszłości mam zamiar kontynuować badania nad skutkami zanieczyszczenia gleb oraz optymalizacją metod ich remediacji. Nieco więcej uwagi będę poświęcał ekotoksykologii zanieczyszczeń oraz różnych substancji i materiałów, np. nie rozpoznanych dotychczas zanieczyszczeń pierwiastkami śladowymi oraz odpadami). Będę kontynuował badania nad biodostępnością zanieczyszczeń i rozwojem metod przydatnych w analizie ryzyka związanego z glebami zanieczyszczonymi, w tym nad metodami oceniającymi absorpcję zanieczyszczeń w przewodzie pokarmowym. Badania te zostały rozpoczęte w ścisłej współpracy z Uniwersytetem Stanowym Ohio. W zakresie zanieczyszczeń gleb zamierzam zwrócić uwagę na zanieczyszczenia o wzrastającym znaczeniu (*tzw. emerging pollutants*), takie jak nonocząstki lub nanoplastiki, z uwzględnieniem skali zanieczyszczenia, dróg oddziaływania, skutków środowiskowych i metod przeciwdziałania.

Będę kontynuował badania nad wyjaśnieniem kierunków zmian zawartości węgla w glebach użytkowanych rolniczo, w celu wyjaśnienia rozbieżności pomiędzy statystycznymi ocenami bilansu węgla w glebie a danymi pomiarowymi, wskazującymi na brak zmian zawartości węgla. Ponadto dalszych szczegółowych badań wymaga ocena środowiskowych skutków stosowania różnych odpadów do nawożenia gleb, mając na względzie ochronę gleb przed zanieczyszczeniem a jednocześnie ocenę możliwości odzysku materii organicznej i poprawy jakości gleb zdegradowanych. W najbliższych latach można się spodziewać znaczącego wzrostu zainteresowania partnerów przemysłowych poszukujących bezpiecznych metod przetwarzania odpadów, np. z biogazowni, lub odpadów komunalnych, na nawozy organiczne i tzw. polepszacze glebowe.

Do moich nowych zagadnień badawczych, odpowiadających na bieżące problemy społeczne i środowiskowe, będą należeć badania wpływu gospodarki glebami oraz degradacji gleb na zdrowie i jakość życia ludzi. W tym celu niezbędna jest waloryzacja rożnych ekosystemowych funkcji gleb, kształtujących tzw. zrównoważony rozwój gospodarczy oraz warunki życia ludzi. Moje szczególne zainteresowanie będzie się skupiało na wpływie gospodarki glebami w procesach urbanizacji na warunki życia ludzi, poprzez kształtowanie jakości powietrza, występowanie ekstremów temperaturowych, kształtowanie ryzyka powodziowego, dostępność funkcji rekreacyjnych gruntów, wpływ zabudowy przestrzennej na samopoczucie i zdrowie ludzi. Niezwykle ważny do zrównoważonego rozwoju miast będzie rozwój metod i narzędzi do uwzględniania jakości gleb w planowaniu przestrzennym oraz wzrost świadomości w zakresie potrzeby ochrony funkcji gleb.

Zestawienie dorobku naukowego (łącznie z publikacjami wykazanymi w głównym osiągnieciu)

Liczba publikacji z listy JCR: **28**

Liczba pozostałych publikacji naukowych: **41**

Liczba raportów i ekspertyz: **37**

Sumaryczny Impact Factor publikacji (wg roku wydania): **72,128**

Liczba punktów wg listy MNiSW (wg roku wydania): **992**

Liczba cytowań wg bazy Web of Science (All databases): **510**

Liczba cytowań wg bazy Scopus: **561**

Indeks Hirscha wg bazy Web of Science: **11**

Indeks Hirscha wg bazy Scopus: **11**

Spośród 69 prac naukowych, 38 prac opublikowano w języku angielskim, przy czym wszystkie prace w czasopismach z listy JCR (28) opublikowano w języku angielskim.

Syntetyczne zestawienie dorobku naukowego

Lp.	Rodzaj publikacji	Język	Liczba prac
1	Czasopisma z Impact Factor	A (ang.)	28
2	Inne czasopisma	A	3
		P (pol.)	3
3	Rozdziały w monografiach	A	7
		P	24
4	Monografie	A	0
		P	4
5	Raporty i ekspertyzy	A	23
		P	14
6	Referaty na konferencjach, warsztatach naukowych i spotkaniach projektowych	A	55
		P	21
7	Komunikaty w wydawnictwach konferencyjnych	A	61
		P	19

Grzegorz Siebert