



**dr Łukasz Uzarowicz**

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie  
Wydział Rolnictwa i Biologii  
Katedra Nauk o Środowisku Glebowym

Tytuł osiągnięcia naukowego:  
**„Wskaźniki procesów glebotwórczych i ewolucja technogenicznych utworów glebowych (Technosols) ukształtowanych na składowiskach odpadów popiołowo-żużlowych z elektrowni węglowych”**

**Autoreferat w języku polskim**

Warszawa 2018

**Dr Łukasz Uzarowicz**

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
Wydział Rolnictwa i Biologii  
Katedra Nauk o Środowisku Glebowym  
ul. Nowoursynowska 159, budynek 37  
02-776 Warszawa

**POSIADANE DYPLOMY, STOPNIE NAUKOWE – Z PODANIEM NAZWY, MIEJSCA I ROKU ICH UZYSKANIA ORAZ TYTUŁU ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

- **2000–2005 – magister geografii**, Uniwersytet Jagielloński  
praca magisterska pt. „Stadia rozwojowe rędzin rumoszowych *Calcaric Regosols* w Pieninach”, promotor: prof. dr hab. Stefan Skiba, data obrony: 22.06.2005
- **2002–2007 – magister geologii**, Uniwersytet Jagielloński  
praca magisterska pt. „Przemiany krzemianów warstwowych w kwaśnym środowisku strefy wietrzenia łupków pirytonośnych z Wieściszowic (Rudawy Janowickie)”, promotor: dr hab. Marek Michalik, data obrony: 28.09.2007
- **2005–2009 – doktor nauk o Ziemi** w zakresie geografii, specjalność gleboznawstwo  
Uniwersytet Jagielloński, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Zakład Gleboznawstwa i Geografii Gleb  
praca doktorska pt. „Rola minerałów siarczkowych w kształtowaniu właściwości utworów glebowych (*Technosols*) na hałdach kopalnianych”, promotor: prof. dr hab. Stefan Skiba, recenzenci: dr hab. Zbigniew Zagórski prof. SGGW, dr hab. inż. Marek Michalik; data obrony: 16.06.2009  
data uzyskania stopnia naukowego: 23.06.2009 uchwałą Rady Wydziału Biologii i Nauk o Ziemi Uniwersytetu Jagiellońskiego

**INFORMACJE O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH**

- **2009–2012** – adiunkt, Politechnika Warszawska, Wydział Geodezji i Kartografii, Katedra Gospodarki Przestrzennej i Nauk o Środowisku Przyrodniczym
- **2012–obecnie** – adiunkt, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Rolnictwa i Biologii, Katedra Nauk o Środowisku Glebowym, Zakład Gleboznawstwa

**WSKAZANIE OSIĄGNIĘCIA 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. 2016 R. POZ. 882 ZE ZM. W DZ. U. Z 2016 R. POZ. 1311.)**

Osiągnięciem naukowym wynikającym 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.) jest cykl publikacji naukowych powiązanych tematycznie.

Tytuł osiągnięcia naukowego:

**„Wskaźniki procesów glebotwórczych i ewolucja technogenicznych utworów glebowych (Technosols) ukształtowanych na składowiskach odpadów popiołowo-żużlowych z elektrowni węglowych”**

Na osiągnięcie składają się następujące publikacje:

- 1) **Uzarowicz Ł.**, Zagórski Z., 2015. Mineralogy and chemical composition of technogenic soils (Technosols) developed from fly ash and bottom ash from selected thermal power stations in Poland. *Soil Science Annual*, 66(2): 82-91. DOI: 10.1515/ssa-2015-0023, **14 pkt MNiSW, IF = 0**  
*Mój udział procentowy w publikacji wynosi 80%.*
- 2) **Uzarowicz Ł.**, Zagórski Z., Mendak E., Bartmiński P., Szara E., Kondras M., Oktaba L., Turek A., Rogoziński R., 2017. Technogenic soils (Technosols) developed from fly ash and bottom ash from thermal power stations combusting bituminous coal and lignite. Part I. Properties, classification, and indicators of early pedogenesis. *Catena*, 157C: 75-89. DOI: 10.1016/j.catena.2017.05.010, **35 pkt MNiSW, IF (2016) = 3,191**  
*Mój udział procentowy w publikacji wynosi 75%.*
- 3) **Uzarowicz Ł.**, Skiba M., Leue M., Zagórski Z., Gąsiński A., Trzciński J., 2018a. Technogenic soils (Technosols) developed from fly ash and bottom ash from thermal power stations combusting bituminous coal and lignite. Part II. Mineral transformations and soil evolution. *Catena* 162C: 255-269. DOI: 10.1016/j.catena.2017.11.005, **35 pkt MNiSW, IF (2017) = 3,256**  
*Mój udział procentowy w publikacji wynosi 70%.*
- 4) **Uzarowicz Ł.**, Kwasowski W., Śpiewak O., Świtoniak M., 2018b. Indicators of pedogenesis of Technosol developed in an ash settling pond at the Bełchatów thermal power station (central Poland). *Soil Science Annual*, 69(1): 49-59. DOI: 10.2478/ssa-2018-0006, **14 pkt MNiSW, IF = 0**  
*Mój udział procentowy w publikacji wynosi 60%.*

Łączna liczba punktów za publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego, zgodnie z punktacją MNiSW w poszczególnych latach wydania publikacji wynosi 98, natomiast ich sumaryczny współczynnik wpływu Impact Factor IF wynosi 6,447.

Oświadczenia współautorów o ich szczegółowym wkładzie w przygotowanie w/w publikacji znajdują się w załączniku nr 4 do wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego.

## **OMÓWIENIE CELU NAUKOWEGO WW. PRAC I OSIĄGNIĘTYCH WYNIKÓW WRAZ Z OMÓWIENIEM ICH EWENTUALNEGO WYKORZYSTANIA**

### **Wprowadzenie w tematykę badań**

Działalność elektrowni węglowych powoduje powstawanie dużych ilości odpadów stałych, wśród których dominują popioły lotne i żużle paleniskowe. Odpady te są ubocznym produktem spalania węgla. Powstają one dlatego, że węgiel kamienny i brunatny wykorzystywany w elektrowniach zawsze zawiera domieszki mineralne (np. kwarc, minerały ilaste, węglany, siarczki), które nie ulegają spaleniowi i stanowią rezydium po procesie spalania w piecu. Popioły i żużle są częściowo wykorzystywane w gospodarce jako surowiec wtórny (np. jako dodatek do cementu, materiał do budowy nasypów drogowych i/lub niwelacji terenu, jako polepszacze doglebowe, substancje do neutralizacji gleb kwaśnych, surowiec do przemysłowej produkcji zeolitów). Jednakże niewykorzystana partia popiołów i żużli jest przy elektrowniach składowana na powierzchni terenu na składowiskach mokrych (odpady są tam transportowane rurociągami w postaci zawiesiny wodnej i deponowane w stawach) lub suchych (odpady są transportowane na sucho transportem samochodowym lub kolejowym i deponowane w postaci hałd). Zdeponowanie odpadów na powierzchni terenu inicjuje ich intensywne przemiany wietrzeniowe. Dzieje się tak dlatego, że popioły i żużle z elektrowni zawierają składniki niestabilne w środowisku naturalnym (np. tlenki Ca i Mg, amorficzne substancje glinokrzemianowe, anhydryt), które dążą do osiągnięcia stanu równowagi ze środowiskiem. Przemiany tlenków Ca i Mg do wodorotlenków są jednymi z najważniejszych procesów wietrzeniowych w pierwszym okresie po zdeponowaniu popiołów i żużli na składowisku, ponieważ powodują alkalizację składowanych utworów.

Składowiska odpadów popiołowo-żuźlowych są rekultywowane lub ulegają zarastaniu w wyniku naturalnej sukcesji roślinnej. Pojawienie się roślinności na powierzchniach składowisk inicjuje procesy glebotwórcze. W ten sposób na składowiskach zaczynają się tworzyć technogeniczne utwory glebowe (technosole), które w międzynarodowej klasyfikacji gleb WRB znane są pod nazwą „Technosols”. Pomimo antropogenicznej natury substratu glebowego, omawiane utwory podlegają naturalnym procesom wietrzeniowym i glebotwórczym, co pociąga za sobą potrzebę badań tempa i kierunków tych procesów.

Dotychczasowe prace na składowiskach odpadów popiołowo-żuźlowych skupiały się głównie na sposobach ich rekultywacji (m.in. Maciak, 1978; Maciak i in., 1974, 1976a, 1976b, 1976c, 1979; Gilewska 2004, 2006; Strączyńska i Strączyński 2007, 2008; Strączyńska i in. 2004, 2009; Pietrzykowski i in. 2010a, 2010b, 2013, 2015, 2018; Weber i in. 2015). Procesy wietrzeniowe i glebotwórcze w technosolach ukształtowanych na składowiskach popiołowo-żuźlowych z elektrowni węglowych nie były do tej pory przedmiotem szerszych badań. Pionierskie w skali międzynarodowej badania na ten temat prowadził w Polsce w latach 70. XX w. prof. Franciszek Maciak ze współpracownikami (Maciak i in. 1976c). Badania wykazały, że rekultywacja i kilkuletnia uprawa traw i roślin bobowatych na składowiskach powoduje następujące zmiany właściwości antropogenicznego substratu glebowego (tj. odpadów popiołowo-żuźlowych): (1) zmiana barwy uprawnej warstwy popiołu z jasnej na ciemnoszarą, (2) akumulacja glebowej materii organicznej w stropie profili glebowych, (3) wzrost tempa

rozkładu celulozy wskazujący na rosnącą aktywność mikrobiologiczną utworów glebowych, (4) spadek stopnia alkaliczności i (5) wzrost zawartości węglanów. Na początku XXI w. badania omawianych gleb prowadzili naukowcy niemieccy (Zikeli i in., 2002, 2004, 2005). Badania wykazały, że efektem kilkudziesięciu lat procesów glebotwórczych zachodzących w utworach glebowych występujących na składowiskach popiołów po spalaniu węgla brunatnego jest m.in. (1) wymywanie gipsu i węglanów z górnych części gleb, (2) akumulacja glebowej materii organicznej oraz (3) spadek wartości stosunku C:N w górnych częściach profili glebowych świadczący o gromadzeniu glebowej materii organicznej.

W dotychczasowych badaniach omawianych utworów glebowych zwracano mało uwagi na tempo przemian właściwości gleb, ponieważ nie badano szczegółowo sekwencji glebowych na składowiskach. Ponadto nie prowadzono badań w celu określenia różnic we właściwościach utworów glebowych w zależności od tego, czy odpady popiołowo-żużłowe pochodzą ze spalania węgla kamiennego czy brunatnego. Słabo rozpoznane są dotychczas przemiany mineralne substratu glebowego omawianych utworów wraz z ich wiekiem. W literaturze mało uwagi poświęcano ewolucji omawianych technosoli w środowisku.

#### Literatura cytowana powyżej:

1. Gilewska M., 2004. Rekultywacja biologiczna składowisk popiołowych z węgla brunatnego (Biological reclamation of power plant lignite ash dump sites). *Roczniki Gleboznawcze - Soil Science Annual*, 55(2): 103-110.
2. Gilewska M., 2006. Wykorzystanie odpadów w rekultywacji gruntów pogórnich i składowisk popiołowych (Utilization of wastes in reclamation of post mining soils and ash dump sites). *Roczniki Gleboznawcze - Soil Science Annual*, 57(1/2): 75-81.
3. Maciak, F., 1978. Wpływ siedmioletniego okresu rekultywacji hałdy popiołu elektrowni Konin na plonowanie kępki kopywki i niektóre zmiany glebowe (Effect of the seven-year recultivation on an ash dump of the Konin power plant on yielding of cocksfoot and some changes of soil). *Roczniki Gleboznawcze - Soil Science Annual* 29(3), 203–216 (in Polish with English abstract).
4. Maciak, F., Liwski, S., Biernacka, E., 1974. Właściwości fizykochemiczne i biochemiczne utworów ze składowisk popiołu po węglu brunatnym i kamiennym (Some physico-chemical and biochemical properties of the ash dumps after brown and hard coal). *Roczniki Gleboznawcze - Soil Science Annual* 25(3), 191–205 (in Polish with English abstract).
5. Maciak, F., Liwski, S., Prończuk, J., 1976a. Rekultywacja rolnicza składowisk odpadów paleniskowych (popiołów) z węgla brunatnego i kamiennego. Część I. Wzrost roślinności na składowiskach popiołu w zależności od zabiegów agrotechnicznych i nawożenia (Agricultural recultivation of furnace waste (ash) dumps from brown and hard coal. Part I. Vegetation growth on ash dumps depending on agronomic measures and fertilization). *Roczniki Gleboznawcze - Soil Science Annual* 27(4), 149–169 (in Polish with English abstract).
6. Maciak, F., Liwski, S., Biernacka, E., 1976b. Rekultywacja rolnicza składowisk odpadów paleniskowych (popiołów) z węgla brunatnego i kamiennego. Część II. Skład chemiczny roślin ze składowisk popiołu po węglu brunatnym i kamiennym (Agricultural recultivation on furnace waste (ash) dumps from brown and hard coal. Part II. Chemical composition of plants cultivated on brown and hard coal ash dumps). *Roczniki Gleboznawcze - Soil Science Annual* 27(4), 171–187 (in Polish with English abstract).
7. Maciak, F., Liwski, S., Biernacka, E., 1976c. Rekultywacja rolnicza składowisk odpadów paleniskowych (popiołów) z węgla brunatnego i kamiennego. Część III. Przebieg

- procesów glebotwórczych na składowiskach popiołu pod wpływem roślinności trawiastej i motylkowej (Agricultural recultivation of furnace waste (ash) dumps from brown and hard coal. Part III. Course of soil-forming processes in ash dumps under influence of grass and leguminous vegetation). *Roczniki Gleboznawcze - Soil Science Annual* 27(4), 189–209 (in Polish with English abstract).
8. Maciak, F., Liwski, S., Jeżewski, Z., 1979. Rekultywacja hałdy popiołu z węgla brunatnego elektrowni Konin przez zadrzewienie i zakrzewienie (Recultivation of a brown coal dump at the Konin power plant by means of planting of trees and shrubs). *Roczniki Gleboznawcze - Soil Science Annual* 30(3), 179–198 (in Polish with English abstract).
  9. Pietrzykowski, M., Krzaklewski, W., Gaik, G., 2010a. Ocena wzrostu zalesień z dominacją sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) na poletkach doświadczalnych na odpadach paleniskowych elektrowni „Bełchatów” (Assessment of forest growth with plantings dominated by scots pine (*Pinus sylvestris* L.) on experimental plots on a fly ash disposal site at the Bełchatów Power Plant). *University of Zielona Góra, Scientifical Reports, Environmental Engineering*, 137(17): 64–74 (in Polish with English abstract).
  10. Pietrzykowski M., Pająk M., Krzaklewski W., 2010b. Próba zastosowania metod liczbowej wyceny gleb na podstawie Indeksu Trofizmu Gleb Leśnych (ITGL) oraz Siedliskowego Indeksu Glebowego (SIG) do opisu zmienności warunków siedliskowych na zrekultywowanych dla leśnictwa zwałowiskach KWB "Bełchatów" (The assessment of possibility of using soil quality estimation numerical methods based on the Forest Soil Trophism Index (ITGL) and Soil Site Index (SIG) for description of habitat conditions on spoil heap KWB "Bełchatów" reclaimed to forest). *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 26(3): 155–165 (in Polish with English abstract).
  11. Pietrzykowski M., Krzaklewski W., Woś B., 2013. Zawartość pierwiastków śladowych (Mn, Zn, Cu, Cd, Pb, Cr) w liściach olsz (*Alnus* sp.) zastosowanych jako gatunki fitomelioracyjne na składowisku odpadów paleniskowych (Concentration of trace elements (Mn, Zn, Cu, Cd, Pb, Cr) in alder (*Alnus* sp.) leaves used as phytomelioration species on fly ash disposal). *University of Zielona Góra, Scientifical Reports, Environmental Engineering*, 151(31): 26–34 (in Polish with English abstract).
  12. Pietrzykowski M., Krzaklewski W., Woś B., 2015. Preliminary assessment of growth and survival of green alder (*Alnus viridis*), a potential biological stabilizer on fly ash disposal sites. *Journal of Forestry Research*, 26, 1: 131–136.
  13. Pietrzykowski M., Woś B., Pająk M., Wanic T., Krzaklewski W., Chodak M., 2018. Reclamation of a lignite combustion waste disposal site with alders (*Alnus* sp.): assessment of tree growth and nutrient status within 10 years of the experiment. *Environmental Science and Pollution Research*: 1–9.
  14. Strączyńska S., Strączyński S., 2007. Charakterystyka gleb industrioziemnych pod nasadzeniami brzozy brodawkowatej (Characterisation of industrial soils under cultures of silver birch). *Roczniki Gleboznawcze - Soil Science Annual*, 58(3/4): 126–131 (in Polish with English abstract).
  15. Strączyńska S., Strączyński S., 2008. Ocena warunków siedliskowych pod nasadzeniami drzew na rekultywowanym składowisku popiołów elektrowniowych (Estimation of habitat conditions under trees planted on reclaimed power plant ash dumps). *Roczniki Gleboznawcze - Soil Science Annual*, 59(2): 223–229 (in Polish with English abstract).
  16. Strączyńska S., Strączyński S., Gazdowicz W., 2004. Wpływ pokryw roślinnych na cechy morfologiczne i niektóre właściwości utworów obwałowania składowiska odpadów paleniskowych (The influence of cover vegetation on morphological characteristics and some properties of embankment formation of furnace discards dump). *Roczniki Gleboznawcze - Soil Science Annual*, 55(2): 397–404 (in Polish with English abstract).
  17. Strączyńska S., Strączyński S., Cieścińska B., Gwiżdż M., 2009. Właściwości materii organicznej poziomu powierzchniowego gleb antropogenicznych w rejonie Bełchatowa (Organic matter properties in the surface layer anthropogenic soils in Bełchatów region).

- Roczniki Gleboznawcze – Soil Science Annual, 60(3): 139–144 (in Polish with English abstract).
18. Weber J., Strączyńska S., Kocowicz A., Gilewska M., Bogacz A., Gwiżdż M., Dębicka M., 2015. Properties of soil materials derived from fly ash 11 years after revegetation of post-mining excavation. *Catena*, 133: 250-254.
  19. Zikeli, S., Jahn, R., Kastler, M., 2002. Initial soil development in lignite ash landfills and settling ponds in Saxony-Anhalt, Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 165, 530–536.
  20. Zikeli, S., Kastler, M., Jahn, R., 2004. Cation exchange properties of soils derived from lignite ashes. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 167(4), 439-448.
  21. Zikeli, S., Kastler, M., Jahn, R., 2005. Classification of anthrosols with vitric/andic properties derived from lignite ash. *Geoderma* 124(3-4), 253-265.

## **Omówienie głównych wątków serii publikacji składających się na osiągnięcie naukowe**

### *Cel i obiekt badań*

Głównym celem prac wnioskodawcy było wykonanie badań ukierunkowanych na określenie najważniejszych aspektów przyrodniczego funkcjonowania technogenicznych utworów glebowych wykształconych na składowiskach odpadów (popiołów lotnych oraz żużli paleniskowych) z elektrowni węglowych opalanych zarówno węglem kamiennym, jak i węglem brunatnym. Szczegółowe cele można sformułować w postaci następujących pytań badawczych:

- jakie są właściwości oraz jak, wraz ze stopniem zaawansowania procesów glebotwórczych, zmienia się morfologia oraz właściwości fizyczne i chemiczne utworów glebowych kształtujących się z odpadów pochodzących z elektrowni węglowych?
- jakie przemiany mineralne występują w tych utworach glebowych oraz jakie są kierunki tych przemian?
- jaka jest ewolucja tych utworów w środowisku?

Aby zrealizować założone cele, wybrano kilka powierzchni badawczych zlokalizowanych w różnych częściach Polski. Do badań wytypowano reprezentatywne utwory glebowe, których lokalizację ustalono po wstępnych rozmowach z pracownikami elektrowni oraz po wykonanym potem rekonesansie terenowym, a także po zapoznaniu się z dostępną literaturą naukową dotyczącą gleb wytworzonych z popioło-żużli oraz rekultywacji składowisk odpadów popiołowo-żuźlowych. Badano utwory glebowe występujące zarówno na składowiskach mokrych, jak i suchych. Badane utwory glebowe ułożono w sekwencje (osobno na składowiskach odpadów po spaleniu węgla kamiennego i brunatnego), co umożliwiło określenie kierunków przemian zachodzących w technosolach w czasie. Wiek określonych utworów glebowych określono na podstawie danych (uzyskanych z elektrowni), kiedy na określonym składowisku zdeponowano ostatnie partie odpadów popiołowo-żuźlowych. Badano następujące sekwencje gleb:

1. Sekwencja wiekowa utworów glebowych na składowiskach popioło-żużli po spaleniu węgla kamiennego z Elektrowni Łaziska (Uzarowicz i Zagórski 2015; Uzarowicz i in. 2017; Uzarowicz i in. 2018a; Uzarowicz 2018b) obejmowała

cztery profile (w publikacjach oznaczone symbolami L1, L2, L3 i L4) mające, odpowiednio, 5, 20, 35 i około 60 lat. Sekwencja ta obejmowała utwory z niewielką ingerencją człowieka w ich rozwój (brak lub niewielka modyfikacja profili glebowych w wyniku rekultywacji). Najstarszy z tych utworów (profil L4) rozwinął się na składowisku, na które roślinność weszła w wyniku naturalnej sukcesji, dzięki czemu możliwe było określenie głównych kierunków przemian substratu glebowego w wyniku naturalnych procesów glebotwórczych.

2. Sekwencja utworów glebowych na składowiskach popioło-żużli po spaleniu węgla brunatnego z Elektrowni Pątnów i Konin (Uzarowicz i Zagórski 2015; Uzarowicz i in. 2017; Uzarowicz i in. 2018a; Uzarowicz 2018a) obejmowała trzy profile (w publikacjach oznaczone symbolami K2, K3 i K5) mające około 40 lat. Mimo że utwory te nie różniły się wiekiem, profil K5 w sekwencji reprezentował utwór glebowy poddany rekultywacji (proces ten polegał tam na rozkruszeniu scementowanego popiołu lotnego do głębokości około 0,5 m oraz wymieszaniu pokruszonego popiołu z glebową materią organiczną i torfem), a następnie kilkuletniej uprawie traw i roślin bobowatych. Profil ten został zlokalizowany na składowisku przy Elektrowni Konin, gdzie rekultywację i swoje badania prowadzili wcześniej Maciak i in. (1976c). Rekultywacja i uprawa spowodowała przyspieszenie tempa przemian wietrzeniowych i glebotwórczych, dzięki czemu zaistniała możliwość analizy, jak procesy glebotwórcze przyspieszone działalnością rekultywacyjną człowieka wpływają na zmiany właściwości i przemiany mineralne utworów glebowych ukształtowanych z popioło-żużli po spaleniu węgla brunatnego z regionu konińskiego.

3. Sekwencja wiekowa utworów glebowych na składowisku „Bagno-Lubień”, gdzie deponowane są popioło-żużle po spaleniu węgla brunatnego z Elektrowni Bełchatów (Uzarowicz i in. 2018b) obejmowała trzy profile (w publikacji oznaczone symbolami BE1, BE2 i BE3) mające, odpowiednio, kilka miesięcy, około 20 i około 30 lat. Sekwencja ta obejmowała utwory z niewielką ingerencją człowieka w ich rozwój (brak lub niewielka ingerencja procesów rekultywacji).

Dla celów porównawczych, w każdej sekwencji zbadano właściwości „świeżych” (niezwietrzałych) popiołów lotnych i żużli paleniskowych pochodzących z danej elektrowni z bieżącej produkcji.

### *Morfologiczne i fizyko-chemiczne wskaźniki procesów glebotwórczych w badanych utworach glebowych*

Badane gleby to słabo ukształtowane utwory technogeniczne (Uzarowicz i in. 2017; Uzarowicz 2018a; Uzarowicz 2018b; Uzarowicz i in. 2018b). W badanych profilach nie występowały dobrze wykształcone poziomy genetyczne. Jedynie w najstarszych utworach porośniętych roślinnością leśną (profile L4, BE2 i BE3) lub w utworach, które zostały zrekultywowane i w ten sposób przeszły okres przyspieszonej pedogenezy (profil K5), występowały stosunkowo dobrze rozwinięte poziomy A ukształtowane w górnych częściach profili. Materiał glebowy w tych poziomach posiadał strukturę gruzełkową. Gleby występujące na dawnych mokrych składowiskach (bez względu na to, czy były to odpady po spalaniu węgla kamiennego czy brunatnego) posiadały charakterystyczne warstwowanie (laminację) materiału glebowego widoczne w morfologii profili oraz objawiające się zmienną barwą i uziarnieniem warstw. Ta



cecha nie była widoczna w utworach ukształtowanych na składowiskach suchych, gdzie materiał glebowy charakteryzował się morfologiczną jednorodnością i brakiem warstwowania. Oddziaływanie korzeni na materiał glebowy w najstarszych utworach w każdej z badanych sekwencji spowodowało rozluźnienie materiału glebowego.

Wszystkie badane gleby wykazywały niską gęstość objętościową (od 0,5 do 1,4 g·cm<sup>-3</sup>) oraz wysoką porowatość ogólną (48–80%). Wartości pH (w 1M KCl) wynosiły 5,2–10,3 (gleby wytworzone z odpadów po spaleniu węgla kamiennego), 7,8–12,6 (gleby wytworzone z odpadów po spaleniu węgla brunatnego z regionu konińskiego) oraz 8,0–9,4 (gleby wytworzone z odpadów po spaleniu węgla brunatnego z regionu bełchatowskiego). Zawartość węglanów była zróżnicowana i wynosiła od 0 do 5,9% (gleby z odpadów po spaleniu węgla kamiennego), od 0 do 89,7% (gleby z odpadów po spaleniu węgla brunatnego z regionu konińskiego) oraz od 0,3 do 7,9% (gleby z odpadów po spaleniu węgla brunatnego z regionu bełchatowskiego). Gleby wytworzone z odpadów po spaleniu węgla brunatnego z regionu konińskiego często posiadały warstwy scementowane przez węglan wapnia. Cecha ta nie występowała w pozostałych badanych utworach. Zawartość węgla organicznego w poziomach organicznych wynosiła maksymalnie 19,8% (gleby wytworzone z odpadów po spaleniu węgla kamiennego), 13,7% (w utworach wytworzonych z odpadów po spaleniu węgla brunatnego z regionu konińskiego) oraz 38,8% (w utworach wytworzonych z odpadów po spaleniu węgla brunatnego z regionu bełchatowskiego). Zawartości azotu ogólnego wahały się w granicach 0,01–0,74% (gleby wytworzone z odpadów po spaleniu węgla kamiennego), 0–0,56% (gleby wytworzone z odpadów po spaleniu węgla brunatnego z regionu konińskiego) oraz 0–0,90% (gleby wytworzone z odpadów po spaleniu węgla brunatnego z regionu bełchatowskiego). Stosunek C:N był bardzo wysoki w materiale popiołowo-żuźlowym w dolnych częściach profili, co było spowodowane obecnością niedopalonych fragmentów węgla przy jednoczesnym niedoborze azotu. Stosunek ten malał ku górze profili glebowych, co należy wiązać z obecnością glebowej materii organicznej. Wszystkie badane odpady i utwory glebowe charakteryzowały się bardzo niską kwasowością hydrolityczną lub wręcz jej brakiem. Kationy zasadowe (głównie Ca i Mg) dominowały w kompleksie sorpcyjnym wszystkich badanych gleb. Stopień wysycenia kompleksu zasadami osiągał zazwyczaj wartości >90%. Retencja fosforanów (tj. informacja o tym, jaka część pierwotnej ilości jonów fosforanowych znajdujących się w roztworze analitycznym została zaadsorbowana przez glebę) była zróżnicowana i wynosiła 10,1–81,1% (gleby wytworzone z odpadów po spaleniu węgla kamiennego) oraz 10,7–95,6% (gleby wytworzone z odpadów po spaleniu węgla brunatnego z regionu konińskiego).

Badania pedogenicznych form Fe, Al, Si i Mn (Uzarowicz i in. 2017) wykazały, że zarówno ditionitowe, jak i szczawianowe formy tych pierwiastków charakteryzują się bardzo dużą zmiennością w profilach glebowych, co spowodowane jest dużym zróżnicowaniem właściwości popiołowo-żuźłowego substratu glebowego. Najbardziej wyraźną tendencją zmian, jaką zauważono na podstawie uzyskanych wyników, był wzrost zawartości szczawianowych form Al i Si wraz z wiekiem gleb, co sugeruje, że im starszy utwór glebowy (tj. im bardziej zaawansowane są procesy wietrzeniowe i glebotwórcze), tym więcej jest słabo wykrystalizowanych form Al i Si w badanych glebach. Ta tendencja najlepiej widoczna jest w przypadku utworów wytworzonych z odpadów po spaleniu węgla kamiennego. Wyniki badań wskazują również, że ditionitowe i szczawianowe formy Fe nie są dobrymi wskaźnikami stopnia zaawansowania procesów glebotwórczych ze względu na częściowe rozpuszczanie

magnetytu i maghemitu (tlenków żelaza występujących w badanych utworach) podczas ekstrakcji. Wykazano, że w niektórych przypadkach pedogeniczne formy Fe, Al, Si i Mn mogą być wskaźnikiem obecności materiału allogenicznego osadzonego na powierzchni badanych profili glebowych w wyniku depozycji eolicznej lub w czasie rekultywacji.

W ogólnym składzie chemicznym odpadów popiołowo-żużlowych i gleb wytworzonych z odpadów po spaleniu węgla kamiennego z Elektrowni Łaziska dominował Si (Uzarowicz i Zagórski 2015). Pozostałe pierwiastki główne można uszeregować następująco według ich malejących zawartości: Al, Fe, K, Ca, Mg, Ti, Na, P i Mn. Natomiast pierwiastki główne w próbkach po spaleniu węgla brunatnego z regionu konińskiego można uszeregować malejąco w następującą sekwencję: Si, Ca, Fe, Al, Mg, Ti, K, Mn, Na i P. Jednakże w niektórych poziomach wierzchnich zbudowanych z materiału węglanowego dominującym pierwiastkiem był Ca, a pozostałe pierwiastki główne były obecne w mniejszych ilościach.

Badane utwory glebowe charakteryzowały się zróżnicowanym stopniem zasolenia. Bardziej zasolone były utwory glebowe wytworzone z odpadów po spaleniu węgla brunatnego z regionu konińskiego ( $EC_e$  w ekstrakcie z nasyconej pasty glebowej w granicach  $1,4-12,8 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ , średnio  $4,9 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ; materiały niepublikowane) i z regionu bełchatowskiego ( $EC_e$  w ekstrakcie z nasyconej pasty glebowej w granicach  $0,8-4,2 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ , średnio  $2,0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ) (Uzarowicz i in. 2018b) niż węgla kamiennego ( $EC_e$  w granicach  $0,4-2,2 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ , średnio  $0,7 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ; materiały niepublikowane). Zasolenie mierzone w % wahało się od 0,02 do 0,12% (gleby wytworzone z odpadów po spaleniu węgla kamiennego) oraz od 0,07 do 1,40% (gleby wytworzone z odpadów po spaleniu węgla brunatnego z regionu konińskiego). Dominującymi kationami w roztworach glebowych były  $Ca^{2+}$  oraz  $Mg^{2+}$ , natomiast spośród anionów dominowały  $HCO_3^-$  oraz  $SO_4^{2-}$ . Zasolenie badanych gleb i odpadów wynikało z podwyższonej zawartości w/w jonów, nie z obecności dużych ilości  $Na^+$ .

Uzyskane wyniki pozwoliły sklasyfikować badane utwory glebowe. Ze względu na obecność dużych ilości artefaktów, badane gleby zaklasyfikowano wg międzynarodowej klasyfikacji WRB (IUSS Working Group WRB 2015) jako różne warianty Spolic Technosols (lub Leptic Spolic Technosols), którym można przypisać następujące kwalifikatory uzupełniające: Alcalic lub Eutric, Arenic i/lub Loamic, Calcic, Fluvic, Hyperartefactic, Loxic, Ochric, Protosalic, Relocatic, Tephric lub Vitric (Uzarowicz i in. 2017; Uzarowicz i in. 2018b). Definicja kwalifikatora Mollic była prawie całkowicie spełniona (poza pojedynczymi kryteriami cząstkowymi) w przypadku wierzchnich poziomów próchnicznych w najlepiej rozwiniętych profilach wykształconych na kilkudziesięcioletnich składowiskach (profil L4 i K5; Uzarowicz i in. 2017). Poza wymienionymi wyżej kwalifikatorami, zostały spełnione definicje kwalifikatorów Fractic, Limnic i Protocalcic niewymienionych w liście dla Technosols, stąd propozycja, aby lista kwalifikatorów uzupełniających dla gleb Technosols została uzupełniona o te trzy kwalifikatory (Uzarowicz i in. 2017).

Badane gleby zostały sklasyfikowane wg amerykańskiej Soil Taxonomy (Soil Survey Staff 2014) jako Anthroportic Udorthent. Według Systematyki gleb Polski (2011) badane utwory zaklasyfikowano jako gleby industrioziemne inicjalne lub gleby industrioziemne próchniczne (ten ostatni przypadek dotyczy najstarszych profili glebowych z dobrze wykształconym poziomem A).

Uzyskane wyniki (Uzarowicz i in. 2017; Uzarowicz 2018a; Uzarowicz 2018b; Uzarowicz i in. 2018b) dotyczące wymienionych wyżej właściwości doprowadziły do wniosku, że najbardziej specyficznymi właściwościami badanych utworów oraz

najważniejszymi morfologicznymi i fizyko-chemicznymi wskaźnikami pedogenezy są: (1) warstwowanie materiału glebowego w wyniku procesów sedymentacyjnych (dotyczy utworów glebowych na składowiskach mokrych), (2) scementowanie materiału glebowego zawierającego duże ilości węglanów (dotyczy bogatych w Ca popioło-żuźli z regionu konińskiego), (3) powstanie struktury gruzelkowatej w najlepiej rozwiniętych poziomach próchnicznych, (4) wzrost ilości całkowitego węgla organicznego i azotu ogółem wraz z wiekiem w górnych częściach profili w wyniku akumulacji glebowej materii organicznej, (5) spadek wartości pH (zmiana odczynu z silnie zasadowego w najmłodszych profilach glebowych ku mniej zasadowemu lub kwaśnemu w starszych utworach glebowych), (6) powstawanie pedogenicznych węglanów w początkowym etapie rozwoju gleb, a następnie ich wymywanie z wierzchniej warstwy gleby, oraz (7) spadek zasolenia gleby wraz z wiekiem w wyniku wymywania łatwo rozpuszczalnych soli w głąb profili glebowych.

### *Mineralogiczne wskaźniki procesów glebotwórczych w badanych utworach glebowych*

Ważnym aspektem funkcjonowania badanych utworów glebowych były przemiany mineralne. Przemiany te dało się zauważyć, porównując skład mineralny „świeżych” (niezwiędniętych) odpadów (tj. popiołów lotnych i żużli paleniskowych) ze składem mineralnym technosoli na składowiskach mających od kilku do kilkudziesięciu lat (Uzarowicz i Zagórski 2015; Uzarowicz i in. 2018a). Skład mineralny próbek glebowych oraz „świeżych” popiołów lotnych i żużli badano metodą dyfrakcji rentgenowskiej (XRD), metodą spektroskopii absorpcyjnej w podczerwieni (FTIR) oraz za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego wyposażonego w system EDS do analiz chemicznych w mikroobszarze (SEM-EDS). Skład mineralny odpadów i utworów glebowych był zróżnicowany w zależności od typu spalanego węgla (kamienny vs. brunatny), dlatego oba przypadki zostały poniżej omówione osobno. Przemiany mineralne badano na przykładzie gleb ukształtowanych na składowiskach w rejonie Elektrowni Łaziska (elektrownia spalająca węgiel kamienny) oraz Elektrowni Pątnów i Konin (elektrownia spalająca węgiel brunatny).

W składzie mineralnym „świeżych” popiołów lotnych i żużli po spaleniu węgla kamiennego z Elektrowni Łaziska dominowała glinokrzemianowa substancja amorficzna (szkliwo), mullit ( $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ ) oraz kwarc ( $\text{SiO}_2$ ). Występowały tam również tlenki żelaza (głównie magnetyt ( $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$ ), hematyt ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) i maghemit ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ )), a także śladowe ilości żelaza rodzimego, anhydrytu ( $\text{CaSO}_4$ ), korundu ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) i plagioklazów (Uzarowicz i Zagórski 2015; Uzarowicz i in. 2018a). Utwory glebowe wytworzone z popioło-żuźli po spaleniu węgla kamiennego zawierały szkliwo, mullit, kwarc i tlenki Fe jako fazy mineralne odziedziczone z popiołów i żużli. Oprócz nich występowały w utworach glebowych niewielkie ilości (do 2,2%) wtórnego (pedogenicznego) kalcytu ( $\text{CaCO}_3$ ). W najstarszych utworach glebowych (profil L3 – wiek około 35 lat oraz profil L4 – wiek około 60 lat) zauważono brak węglanów w górnych częściach profili, co wskazuje na ich wymycie w wyniku procesów glebotwórczych. W niektórych poziomach glebowych zawierających szczególnie dużo odziedziczonego magnetytu (np. górna część profilu L2), występowały wtórne tlenki i tlenowodorotlenki żelaza – getyt  $\alpha\text{-FeO(OH)}$  i lepidokrokityt  $\gamma\text{-FeO(OH)}$ .

W oparciu o wyniki dotyczące przemian mineralnych zachodzących w technosolach ukształtowanych na składowiskach odpadów popiołowo-żuźlowych po

spaleniu węgla kamiennego z Górnego Śląska, określono następujące mineralogiczne wskaźniki procesów glebotwórczych w tych utworach:

- powstawanie niewielkich ilości węglanu wapnia, a następnie jego wymywanie z górnych części profili glebowych po kilkudziesięciu latach od rozpoczęcia procesu glebotwórczego,
- przemiany tlenków żelaza (pierwotne tlenki żelaza odziedziczone z odpadów popiołowo-żuźlowych, tj. głównie magnetyt i hematyt, ulegają przekształceniu w pedogeniczne tlenki żelaza takie jak getyt, lepidokrokit oraz prawdopodobnie również słabo wykryształizowane fazy Fe, np. ferrihydryt),
- przemiany faz glinokrzemianowych (fazy glinokrzemianowe, reprezentowane w badanych utworach przede wszystkim przez glinokrzemianowe szkliwo, w alkalicznym środowisku glebowym ulegają częściowemu rozpuszczeniu, czego efektem jest wydzielenie do gleb Si i Al, a następnie krystalizacja słabo wykryształizowanych faz mineralnych zawierających Si i Al. Potwierdzają to wysokie zawartości szczawianowych form Si i Al w badanych utworach glebowych (Uzarowicz i in. 2017).

W składzie mineralnym „świeżych” popiołów lotnych i żużli po spaleniu węgla brunatnego z Elektrowni Pątnów i Konin dominował kwarc, występowała glinokrzemianowa substancja amorficzna (szkliwo), a także obecne były zmienne ilości tlenków żelaza (głównie hematyt, a w mniejszym stopniu również magnetyt) (Uzarowicz i Zagórski 2015; Uzarowicz i in. 2018a). W popiołach lotnych, oprócz wyżej wymienionych minerałów, zidentyfikowano ponadto anhydryt ( $\text{CaSO}_4$ ), tlenek wapnia ( $\text{CaO}$ ), peryklaz ( $\text{MgO}$ ) oraz śladowe ilości wysokotemperaturowych faz glinowych i krzemianowych: korund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), krystobalit ( $\text{SiO}_2$ ), bredigit ( $\text{Ca}_7\text{Mg}(\text{SiO}_4)_4$ ) i sanidyn ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ).

Badania wykazały, że najbardziej intensywne przemiany mineralne popiołowego substratu glebowego po spaleniu węgla brunatnego miały miejsce w profilu K5 zlokalizowanym na zrekułtywowanym mokrym składowisku Elektrowni Konin (Uzarowicz i in. 2018a). Profil ten był dwudzielny. W dolnej części profilu występowały scementowane warstwy popiołu lotnego (popiół uległ cementacji po zdeponowaniu na składowisku), natomiast górna część była rozluźniona w wyniku rekułtywacji i kilkuletniej uprawy, dzięki czemu została silnie zmieniona pedogenicznie. W dolnej części profilu K5 zidentyfikowano nietypową jak na warunki naturalne asocjację mineralną składającą się z następujących faz: wateryt (rzadko spotykana w przyrodzie odmiana polimorficzna węglanu wapnia), brucyt ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ), hydrotalkit ( $\text{Mg}_6\text{Al}_2\text{CO}_3(\text{OH})_{16}\cdot 4(\text{H}_2\text{O})$ ), obecne były również siarczany – ettringit ( $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$ ), bassanit ( $\text{CaSO}_4\cdot 0,5(\text{H}_2\text{O})$ ) i gips ( $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). W górnej części profilu K5 (tj. w warstwie rekułtywacyjnej) występował już tylko kalcyt, gips i hydrotalkit (Uzarowicz i in. 2018a), brak było natomiast faz mineralnych występujących w warstwie glebowej nieobjętej procesem glebotwórczym (tj. wateryt, brucyt, bassanit i ettringit). Zawartość gipsu w górnej części profilu K5 malała ku górze. W całym profilu, oprócz wymienionych wyżej minerałów, występowały niewielkie ilości faz odziedziczonych z popiołów (tj. kwarc, szkliwo, hematyt i magnetyt).

W oparciu o wyniki dotyczące przemian mineralnych zachodzących w technosolach ukształtowanych na składowiskach odpadów popiołowo-żuźlowych po spaleniu węgla brunatnego z rejonu konińskiego, określono następujące mineralogiczne wskaźniki procesów glebotwórczych w tych utworach:

- przemiany fazowe węgla wapnia (np. powstawanie waterytu zaraz po depozycji popiołów na składowisku, a następnie jego pedogeniczne przemiany do kalcytu, który jest najbardziej stabilnym węglanem wapnia w środowisku glebowym),
- przemiany minerałów siarczanowych (anhydryt występujący w odpadach popiołowo-żużlowych ulega przekształceniu zaraz po depozycji popiołów na składowisku w bassanit, ettringit i niewielkie ilości gipsu. Minerale te następnie w środowisku glebowym ulegają rozpuszczeniu i/lub ostatecznej transformacji w gips, który jest prawdopodobnie ostatecznym produktem tych przemian. Jako minerał łatwo rozpuszczalny, gips ulega następnie wymywaniu z profilu glebowego),
- przemiany faz zawierających Mg (peryklaz odziedziczony z odpadów popiołowo-żużlowych po depozycji popiołów na składowisku ulega przekształceniu w brucyt i hydrotalkit. Brucyt jest niestabilny w środowisku glebowym i ulega rozpuszczaniu, natomiast hydrotalkit jest fazą bardziej stabilną i pozostaje w glebach po kilkudziesięciu latach od rozpoczęcia procesów wietrzeniowych i glebotwórczych).

Przemiany glinokrzemianowego szkliwa oraz tlenków Fe (magnetyt, hematyt, maghemit) nie zostały dostatecznie dobrze udokumentowane w technosolach ukształtowanych na składowiskach odpadów popiołowo-żużlowych po spalaniu węgla brunatnego z rejonu konińskiego. Przemiany te wymagają dalszych szczegółowych analiz mineralogicznych.

### *Ewolucja badanych utworów*

Uzyskane wyniki (Uzarowicz i in. 2017; Uzarowicz 2018a; Uzarowicz 2018b; Uzarowicz i in. 2018a) stały się podstawą koncepcji ewolucji technosoli ukształtowanych na składowiskach odpadów popiołowo-żużlowych z elektrowni węglowych. Wyróżniono 4 etapy rozwoju badanych gleb: (I) etap powstania materiału macierzystego utworów glebowych (tj. odpadów popiołowo-żużlowych z elektrowni), (II) etap transportu i depozycji odpadów popiołowo-żużlowych na składowisku, w trakcie którego następują pierwsze przemiany odpadów w środowisku, (III) etap wczesnych procesów glebotwórczych, oraz (IV) dalszy etap rozwoju badanych utworów w kierunku lepiej ukształtowanych gleb. Ewolucję badanych utworów określono na przykładzie gleb ukształtowanych na składowiskach w rejonie Elektrowni Łaziska (elektrownia spalająca węgiel kamienny) oraz Elektrowni Pątnów i Konin (elektrownia spalająca węgiel brunatny).

Etap I jest kluczowy, ponieważ determinuje właściwości popiołów i żużli, które następnie wpływają na właściwości omawianych utworów glebowych. Skład i właściwości odpadów zależą m.in. od rodzaju spalanego węgla (kamienny vs. brunatny), typu odpadu (popioły lotne vs. żużle paleniskowe), zawartości i składu mineralnych składników (np. węglany, minerały ilaste, siarczki) występujących w węglu i technologii spalania węgla. Badania „świeżych” (niezwietrzałych) popiołów lotnych i żużli z bezpośredniej produkcji z elektrowni pokazały, że właściwości tych odpadów różnią się znacznie w zależności od rodzaju węgla, którego spalania są efektem. Odpady po spalaniu węgla kamiennego z Górnego Śląska są bogatsze w glinokrzemianowe substancje amorficzne (szkliwo) od odpadów po spalaniu węgla brunatnego z regionu

konińskiego (Uzarowicz i in. 2018a). Te drugie z kolei zawierają więcej Ca w postaci CaO i CaSO<sub>4</sub> oraz Mg w postaci MgO niż te pierwsze. Zauważono duże różnice we właściwościach popiołu lotnego i żużla. Różnice te dotyczą np. składu granulometrycznego (popioły to materiały drobnoziarniste z dużym udziałem frakcji pyłu; żużle to gruboziarniste materiały piaszczysto-żwirowe) i kształtu ziaren (popioły są zbudowane z kulistych ziaren składających się z glinokrzemianowego szkliwa lub z tlenków Fe, np. magnetytu; żużle są zbudowane głównie z glinokrzemianowych spieków w postaci kanciastych ziaren).

Etap II to okres, kiedy odpady popiołowo-żużłowe ulegają pierwszym przemianom wietrzeniowym podczas transportu i depozycji na składowisku. Te przemiany to np. wymywanie słabo rozpuszczalnych soli, częściowe lub całkowite rozpuszczenie niektórych faz (np. siarczanów, glinokrzemianowego szkliwa) obecnych początkowo w odpadach popiołowo-żużłowych, a także powstawanie wtórnych faz mineralnych (wtórne wodorotlenki, siarczany, węglany) w wyniku uwodnienia lub rekrytalizacji z roztworów. W tej fazie kształtuje się również morfologia przyszłych profili glebowych. Na składowiskach mokrych, popioły i żużle sedymentują w środowisku wodnym, co powoduje ich wyraźne warstwowanie (laminację), powstanie warstw wzbogaconych w określone składniki popiołów (np. warstwy wzbogacone w magnetyt lub w cenosfery – kuliste ziarna popiołu puste w środku) oraz kompaktę materiału w środowisku wodnym. Na składowiskach suchych warstwowanie materiału popiołowo-żużłowego jest prawie niewidoczne.

Etap II jest okresem intensywnych przemian mineralnych. Badania wykazały, że przemiany mineralne zachodzące na składowiskach odpadów po spaleniu węgla brunatnego z regionu konińskiego są intensywniejsze niż po spaleniu węgla kamiennego z Górnego Śląska. Dzieje się tak, ponieważ popioły i żużle po spaleniu węgla brunatnego z regionu konińskiego zawierają duże ilości faz niestabilnych w środowisku (np. wapno CaO, peryklaz MgO oraz anhydryt CaSO<sub>4</sub>). Fazy te ulegają szybkiej transformacji do wtórnych węglanów (np. wateryt), wodorotlenków (np. brucyt) i siarczanów (ettringit, bassanit, gips) natychmiast po zmieszaniu popioło-żużli z wodą i ich transporcie oraz depozycji na składowisku. Krystalizacja wtórnych faz mineralnych powoduje silną cementację odpadów na składowiskach. Popioły i żużle po spaleniu węgla kamiennego z Górnego Śląska zawierają niewiele reaktywnych faz mineralnych. Najważniejszym przejawem procesów wietrzeniowych w czasie transportu i depozycji na składowisku jest powstawanie wtórnych węglanów (głównie kalcytu).

Etap III to czas pierwszych pedogenicznych przemian popioło-żużli w środowisku glebowym. W okresie tym odpady popiołowo-żużłowe ulegają fizycznym, chemicznym i biologicznym przemianom prowadzącym do wytworzenia się gleby. Granica między etapem II a III nie jest łatwa do ustalenia. Jednakże według propozycji wnioskodawcy, etap II jest okresem, kiedy popioło-żużle ulegają głównie przemianom fizykochemicznym (rozpuszczanie, rekrytalizacja, procesy sedymentacyjne), przemiany biologiczne ograniczają się prawdopodobnie tylko do działania mikroorganizmów. Z kolei etap III rozpoczyna się, kiedy na powierzchniach składowisk zaczynają dominować procesy pedogeniczne kontrolowane przez czynniki glebotwórcze abiotyczne (właściwości materiału macierzystego, woda, warunki klimatyczne), biotyczne (mikroorganizmy, rośliny i zwierzęta glebowe) oraz antropogeniczne (np. działalność człowieka polegająca m.in. na pracach rekultywacyjnych). Badania wnioskodawcy pokazują, że najważniejszymi czynnikami glebotwórczymi kontrolującymi przebieg procesów glebotwórczych w pierwszych kilkudziesięciu latach pedogenezy są rośliny

(oddziaływanie korzeni na popioło-żuźle, akumulacja materii organicznej na powierzchni składowisk odpadów popiołowo-żuźlowych) oraz działalność człowieka (tj. rekultywacja składowisk). Oba te czynniki, o ile występują, przyspieszają tempo procesów glebotwórczych na składowiskach.

Etap III obejmuje przede wszystkim następujące procesy prowadzące do wytworzenia się gleb na składowiskach odpadów popiołowo-żuźlowych (Uzarowicz i in. 2017): (1) przemiany właściwości fizycznych popioło-żuźli (dezintegracja zagęszczonych lub scementowanych warstw popiołowo-żuźlowych, powstawanie pedogenicznej struktury w wyniku akumulacji glebowej materii organicznej i oddziaływania korzeni roślin), (2) chemiczne przemiany substratu glebowego (np. spadek pH), oraz (3) powstawanie pedogenicznych faz mineralnych (np. kalcyt, gips, tlenowodorotlenki Fe, słabo wykrystalizowane fazy Si i Al), a następnie wymywanie najłatwiej rozpuszczalnych faz (np. kalcyt i gips) z górnych części profili glebowych. Wszystkie te procesy w trakcie etapu III działają równolegle w tym samym czasie.

Etap IV to okres, kiedy badane utwory technogeniczne ulegną na tyle dużym przekształceniom, że będzie je można zaklasyfikować nie do technosoli, a do lepiej ukształtowanej jednostki glebowej. Dalszy spodziewany rozwój badanych utworów w kierunku lepiej ukształtowanych gleb jest możliwy do określenia poprzez porównanie obecnych właściwości tych gleb z właściwościami podobnych gleb występujących w przyrodzie.

Technosole wykształcone z odpadów popiołowo-żuźlowych po spaleniu węgla kamiennego z Górnego Śląska mają wiele cech wspólnych z andosolami (glebami wytworzonymi z popiołów wulkanicznych). Te cechy to: występowanie dużych ilości glinokrzemianowego szkliwa, niska gęstość objętościowa, wysoka porowatość ogólna oraz wysoka retencja fosforanów. Podstawową różnicą jest występowanie węglanów, które są obecne w odpadach popiołowo-żuźlowych, a bardzo rzadko występują w naturalnych popiołach wulkanicznych (e.g. Uehara 2005; Arnalds 2008). Badania wnioskodawcy (Uzarowicz i in. 2017) wykazały, że w czasie pierwszych kilku-kilkunastu lat po zdeponowaniu odpadów na składowisku, popiołowo-żuźłowy substrat glebowy ma cechy materiałów tephric (IUSS Working Group WRB 2015), a już kilkadziesiąt lat po zdeponowaniu substrat ten nabiera właściwości vitric, co potwierdza wzrastający stopień jego przemian wietrzeniowych. W opinii wnioskodawcy, węglany ulegną z czasem wymyciu z profilu glebowego, pH ulegnie obniżeniu, a badane technosole wytworzone z odpadów popiołowo-żuźlowych po spaleniu węgla kamiennego ulegną przekształceniu w gleby przypominające andosole.

Technosole wykształcone z odpadów popiołowo-żuźlowych po spaleniu węgla brunatnego z regionu konińskiego mają wiele cech wspólnych z glebami wytworzonymi ze skał węglanowych (np. wapieni lub margli). Podstawowe cechy wspólne tych gleb to duża zawartość węglanów oraz obecność litej skały (scementowanych odpadów popiołowo-żuźlowych) w podłożu. Scementowane popioło-żuźle bogate w węglany będą cechą trwałą w glebach, dopóki nie zostaną rozdrobnione w wyniku wietrzenia fizycznego i chemicznego oraz oddziaływania korzeni. W ten sposób można wysnuć wniosek, że gleby ukształtowane na niektórych składowiskach w regionie konińskim, gdzie popioło-żuźle uległy scementowaniu dzięki obecności węglanów, są glebami, które można nazwać „antropogenicznymi rędzinami”, a w klasyfikacji WRB można je przyporządkować do Calcaric Leptosols. Na niektórych składowiskach w regionie konińskim występują również gleby, które zawierają duże ilości pedogenicznych węglanów wapnia (np. profil K5, Uzarowicz i in. 2017), zatem mają one cechy gleb z

grupy Calcisols. Należy dodać, że na składowiskach w regionie konińskim występują również utwory glebowe, w których warstwy popioło-żuźli nie są scementowane i zawierają niewiele węglanów. Utwory te mogą z czasem ulec wymyciu węglanów, a ze względu na obecność dużych ilości glinokrzemianowego szkliwa, mogą następnie przekształcić się w gleby o cechach andosoli.

### *Podsumowanie i omówienie potencjalnego wykorzystania uzyskanych wyników badań*

Celem badań wnioskodawcy było określenie wskaźników procesów glebotwórczych w technogenicznych utworach glebowych (Technosols) ukształtowanych na składowiskach odpadów popiołowo-żuźlowych z elektrowni węglowych. Przeprowadzone badania mieszczą się w zakresie badań gleboznawczych ukierunkowanych na określenie genezy i przemian, jakie zachodzą w glebach w wyniku procesów glebotwórczych. Istota i uwarunkowania tych procesów w omawianych technosolach jest bardzo podobna do procesów zachodzących w glebach naturalnych (powstałych samorzutnie w przyrodzie), w tym w glebach użytkowanych rolniczo. Ponadto metodyka badania omawianych technosoli i gleb naturalnych/uprawnych jest taka sama, a jej zróżnicowanie wynika przede wszystkim z celu i obiektu badań.

Do badań zostały wytypowane zróżnicowane wiekowo (maksymalnie 60 lat) składowiska odpadów pochodzących z elektrowni spalających zarówno węgiel kamienny (składowiska Elektrowni Łaziska na Górnym Śląsku), jak i węgiel brunatny (składowiska Elektrowni Pątnów, Elektrowni Konin i Elektrowni Bełchatów). Badano sekwencje glebowe (osobno dla utworów po spaleniu węgla kamiennego i brunatnego), na które składały się: (1) świeże odpady (popioły lotne i żuźle paleniskowe) pobrane z elektrowni bezpośrednio po spaleniu węgla, (2) młode utwory glebowe na niedawno zrehabilitowanych/zazielenionych składowiskach oraz (3) stare utwory wykształcone na składowiskach pokrytych roślinnością kilkadziesiąt lat temu (maksymalnie około 60 lat temu). Takie podejście umożliwiło określenie dynamiki procesów wietrzeniowych i glebotwórczych mających miejsce w glebach wykształconych z odpadów z elektrowni węglowych. Badania wymagały połączenia metod stosowanych w nauce o glebie oraz w naukach geologicznych, w szczególności w mineralogii.

Osiągnięciem wnioskodawcy jest rozpoznanie przemian właściwości fizyko-chemicznych oraz transformacji mineralnych zachodzących w technogenicznych utworach glebowych (Technosols) wytworzonych na składowiskach odpadów popiołowo-żuźlowych z elektrowni węglowych. Za najważniejsze osiągnięcia należy uznać:

- rozpoznanie właściwości fizycznych i chemicznych badanych utworów, co stanowiło podstawę do sklasyfikowania badanych utworów według zaleceń międzynarodowej klasyfikacji gleb WRB, amerykańskiej Soil Taxonomy oraz Systematyki gleb Polski,
- określenie morfologicznych i fizyko-chemicznych wskaźników przemian zachodzących w badanych utworach na podstawie zmian morfologii profili i właściwości gleb w czasie,
- określenie mineralogicznych wskaźników rozwoju badanych gleb na podstawie przemian mineralnych zachodzących w substracie glebowym tych utworów,
- zaproponowanie koncepcji ewolucji omawianych technosoli w środowisku.



Przeprowadzone badania wpisują się w nurt badań prowadzonych w wielu ośrodkach na świecie dotyczących gleb zwanych SIUTMAs (ang. Soils in Urban, Industrial, Traffic, Mining and Military Areas), tj. gleb obszarów miejskich, przemysłowych, komunikacyjnych, górniczych i militarnych, które w klasyfikacji WRB (IUSS Working Group WRB 2015) nazywane są Technosols. Jednym z problemów badawczych dotyczących gleb technogenicznych jest kompleksowe rozpoznanie przemian właściwości utworów glebowych wytworzonych na składowiskach odpadów poprzemysłowych, a w szczególności rozpoznanie transformacji zachodzących w obrębie mineralnego substratu glebowego. Przeprowadzone badania stanowią przyczynek do określenia właściwości technogenicznych utworów glebowych ukształtowanych na składowiskach odpadów popiołowo-żużlowych z elektrowni węglowych. Wykonane badania przyczyniają się do określenia przemian szerokiej gamy faz mineralnych (węglanowych, siarczanowych, magnezowych, tlenków Fe i faz glinokrzemianowych) w alkalicznym środowisku glebowym na powierzchni składowisk odpadów popiołowo-żużlowych z elektrowni węglowych. Przemiany wietrzeniowe odpadów popiołowo-żużlowych, a także przemiany mineralne zachodzące później w utworach glebowych ukształtowanych z tych odpadów są nadal niedostatecznie rozpoznane. W przyszłości wnioskodawca zamierza prowadzić pogłębione analizy nad mechanizmami przemian mineralnych w badanych utworach glebowych. Planowane są również badania mikromorfologiczne, których celem będzie określenie pedogenicznych przemian zachodzących w substracie glebowym omawianych technosoli. Planuje się również badania zmian form pierwiastków śladowych (np. Zn, Pb, Cu, Cd, Ni, Co, As, Mo, Se) wraz ze wzrostem stopnia zaawansowania procesów glebotwórczych, co pozwoli ocenić, jaka część pierwiastków śladowych ulega mobilizacji w trakcie pedogenezy badanych utworów glebowych. Będą ponadto prowadzone badania nad promieniotwórczością oraz właściwościami magnetycznymi tych utworów.

W założeniu wnioskodawcy, uzyskane wyniki mogą się przyczynić do udoskonalenia międzynarodowych klasyfikacji gleb, w szczególności klasyfikacji WRB, o ile sugestie wnioskodawcy przedstawione w jednej z publikacji (Uzarowicz i in. 2017) zostaną uwzględnione w kolejnej edycji tej klasyfikacji. Uzyskane wyniki mogą być również wykorzystane w dyskusji nad klasyfikacją gleb antropogenicznych w kolejnej edycji Systematyki gleb Polski.

Uzyskane wyniki mogą być ponadto wykorzystane podczas projektowania prac rekultywacyjnych na składowiskach odpadów popiołowo-żużlowych z elektrowni węglowych. Znajomość właściwości utworów antropogenicznych (np. popiołów i żużli) jest kluczowa podczas rekultywacji składowisk odpadów poprzemysłowych, ponieważ pozwala odpowiednio dobrać zabiegi z zakresu rekultywacji technicznej i biologicznej, pozwalające na skuteczne wprowadzenie roślinności na składowiska popiołowo-żużłowe. Jest to szczególnie ważne w Polsce, której energetyka oparta jest na spalaniu węgla kamiennego i brunatnego, co generuje duże ilości odpadów popiołowo-żużlowych składowanych na powierzchni terenu.

Podsumowując, wykonane badania mogą przyczynić się przede wszystkim do rozwoju stanu wiedzy z zakresu nauki o glebie i nauk geologicznych (w szczególności mineralogicznych). Wyniki badań mogą też być wykorzystane w ramach zabiegów z zakresu kształtowania środowiska poprzez rekultywację składowisk odpadów popiołowo-żużlowych. Wyniki badań mogą być również zastosowane w naukach rolniczych, ponieważ technosole ukształtowane na składowiskach odpadów popiołowo-

żuźlowych mogą stać się podstawą produkcji biomasy, która może być wykorzystana np. do produkcji energii.

## **OMÓWIENIE POZOSTAŁYCH OSIĄGNIĘĆ NAUKOWO-BADAWCZYCH**

### *1. Przemiany mineralne jako wskaźnik pedogenezy w utworach glebowych (Technosols) wykształconych z odpadów górniczych zawierających siarczki żelaza*

Przeprowadzone badania (Uzarowicz i in. 2008; Uzarowicz 2011; Uzarowicz i Skiba 2011; Uzarowicz i in. 2011, 2012; Uzarowicz i Maciejewska 2012; Uzarowicz 2013; Uzarowicz i Skiba 2013) pozwoliły określić właściwości technogenicznych utworów glebowych wykształconych na hałdach odpadów zawierających siarczki żelaza, a także umożliwiły rozpoznanie najważniejszych przemian mineralnych zachodzących w tych utworach. Prace prowadzono na składowiskach trzech nieczynnych obecnie zakładów przemysłowych: nieczynnej od 1925 roku kopalni pirytu w Wieściszowicach (Sudety Zachodnie), nieczynnej od 1971 roku kopalni pirytu „Staszic” w Rudkach (Góry Świętokrzyskie) oraz nieczynnej od 1999 roku KWK „Siersza” w Trzebini (Wyżyna Śląska). Badania prowadzono w ramach projektu badawczego własnego nr N N305 3251 33 pt. „Wpływ minerałów siarczkowych na właściwości oraz skład mineralny gleb hałd kopalnianych” finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2007–2009. Uzyskane wyniki stanowiły materiał, na podstawie którego wnioskodawca przygotował swoją rozprawę doktorską.

Badania wykazały, że wietrzenie minerałów siarczkowych w badanych utworach glebowych przyczynia się do ich silnego zakwaszenia do wartości pH poniżej 3, o ile nie występują w glebach składniki neutralizujące kwaśny odczyn (np. węglany). W wyniku wietrzenia siarczków żelaza tworzą się m.in. wtórne tlenowodorotlenki żelaza oraz minerały siarczanowe, z których dominuje gips oraz minerały z grupy jarosytu. Stopień zaawansowania przemian siarczków żelaza wzrasta wraz z wiekiem utworów glebowych. Wraz z wiekiem rośnie również stopień krystaliczności tlenków żelaza, ponieważ w młodych utworach glebowych z Rudek dominowały słabo wykrystalizowane tlenki Fe, natomiast w glebach na starych hałdach w Wieściszowicach przeważały lepiej wykrystalizowane tlenki żelaza. W kwaśnych utworach glebowych na odpadach pogórniczych zachodzą intensywne przemiany krzemianów warstwowych polegające na transformacji minerałów odziedziczonych z podłoża (głównie minerałów z grupy miki i chlorytu) do wtórnych minerałów pęczniejących – smektytu, wermikulitu oraz minerałów mieszanopakietowych zawierających pakiety pęczniejące. W poziomach próchnicznych najstarszych utworów glebowych z Wieściszowic prawdopodobne jest powstawanie kaolinitu (Uzarowicz i in. 2011). Badania technogenicznych utworów glebowych zawierających siarczki żelaza wykazały ponadto, że utwory te są silnie zasiarczone i charakteryzują się wysokimi ogólnymi zawartościami niektórych metali śladowych (Cu, Pb, As, Tl, Cr, Co i V). Utwory z rejonu Rudek i Trzebini zawierają duże ogólne ilości pierwiastków promieniotwórczych - U i Th.

Przeprowadzone badania technosoli zawierających siarczki żelaza pozwoliły rozwinąć zagadnienie klasyfikacji tych gleb. Efektem badań było udoskonalenie 3.

wydania międzynarodowej klasyfikacji gleb World Reference Base for Soil Resources (IUSS Working Group WRB 2015). W najnowszej wersji WRB zostały uwzględnione sugestie wnioskodawcy dotyczące zmian w definicjach poziomu thionic oraz materiału sulphuric w odniesieniu do technosoli (sugestie zawarte w publikacji Uzarowicz i Skiba 2011). Na podstawie wyników badań wnioskodawcy (Uzarowicz 2011) wprowadzono także nowy kwalifikator, który według sugestii wnioskodawcy miał nosić nazwę „Radioactive” lub „Radionuclidic” (sugestia zawarta w artykule Charzyński i in. 2013), natomiast ostatecznie w klasyfikacji WRB (IUSS Working Group WRB 2015) zyskał nazwę „Radiotoxic”. Kwalifikator ten informuje o obecności pierwiastków promieniotwórczych w glebach.

## *2. Przemiany krzemianów warstwowych oraz powstawanie minerałów ilastych w glebach i osadach stref wietrzenia siarczków żelaza*

Dotychczasowe prace naukowe wnioskodawcy dotyczyły przemian krzemianów warstwowych oraz powstawania pedogenicznych minerałów ilastych w kwaśnych glebach stref wietrzenia siarczków (Uzarowicz i Skiba 2011; Uzarowicz i in. 2011). Wykazały one, że wraz ze wzrostem stopnia wykształcenia (z wiekiem) gleb rośnie stopień przekształcenia krzemianów warstwowych, co przejawia się zwiększeniem różnorodności składu mineralnego frakcji ilastej gleb oraz względnym wzrostem ilości pedogenicznych krzemianów warstwowych (tj. smektytu, wermikulitu, minerałów mieszanopaketowych zawierających pakiety pęczniejące oraz minerałów ilastych zawierających przewarstwienia wodorotlenowe) w stosunku do minerałów odziedziczonych z podłoża (chloryt, K-mika i Na-mika). Zauważono także zróżnicowanie składu mineralnego frakcji ilastej w obrębie dobrze wykształconych profili gleb brunatnych rozwiniętych naturalnie na łupkach pirytonośnych w Wieściszowicach (Uzarowicz i in. 2011). W poziomach próchnicznych (A) tych gleb, oprócz minerałów odziedziczonych z podłoża, zidentyfikowano szereg nie do końca rozpoznanych minerałów mieszanopaketowych (analizy XRD oraz modelowania dyfraktogramów w programie Sybilla (Chevron™) wykazały, że w próbkach mogą występować minerały typu illit-smektyt, illit-wermikulit, chloryt-smektyt, chloryt-wermikulit, wermikulit-smektyt i/lub kaolinit-smektyt, zarówno o nieuporządkowanej, jak i uporządkowanej strukturze). Natomiast w położonych niżej poziomach wietrzeniowych (Bw) uboższych w glebową materię organiczną, wśród pedogenicznych minerałów ilastych dominował wermikulit zawierający przewarstwienia wodorotlenowe praktycznie bez udziału smektytu.

Badania wnioskodawcy poparte analizami XRD frakcji ilastych oraz modelowaniem dyfraktogramów w programie Sybilla sugerują, że stopień zakwaszenia środowiska wietrzenia determinuje kierunki przemian krzemianów warstwowych w strefach utleniania siarczków (Uzarowicz i Skiba 2011; Uzarowicz i in. 2011, 2012). Badania pokazały, że w warunkach bardzo silnego zakwaszenia (pH <3) w wyniku przemian krzemianów warstwowych (chlorytu i miki) powstaje głównie smektyt (lub minerały mieszanopaketowe zawierające smektyt), natomiast w mniej kwaśnym środowisku (pH około 4,5) produktami przemian krzemianów warstwowych są, poza smektytem, również wermikulit, minerały pęczniejące zawierające przewarstwienia wodorotlenowe oraz minerały mieszanopaketowe, wśród których występuje m.in. minerał mieszanopaketowy typu illit-smektyt-chloryt oraz illit-smektyt, co sugerują

wyniki modelowania dyfraktogramów (Uzarowicz i in. 2012). Wpływ stopnia zakwaszenia na kierunek przemian krzemianów warstwowych potwierdzają analizy XRD frakcji ilastych pochodzących z dwóch niezależnych obiektów badawczych: (1) z technogenicznych utworów glebowych z rejonu nieczynnej kopalni pirytu w Rudkach, które charakteryzowały się silnym zakwaszeniem ( $\text{pH} < 3$ ) dolnej części profilu i mniejszym stopniem zakwaszenia ( $\text{pH} = 4,4$ ) w jego górnej części (Uzarowicz i Skiba 2011), oraz (2) z osadów pochodzących z dwóch zbiorników wodnych charakteryzujących się zróżnicowanym stopniem zakwaszenia wód (jeden ze zbiorników posiadał  $\text{pH}$  wód = 2,7, drugi  $\text{pH} = 4,6$ ) występujących na terenie nieczynnej kopalni pirytu w Wieściszowicach (Uzarowicz i in. 2012).

Badania wnioskodawcy wykazały, że strefy wietrzenia siarczków żelaza są miejscem, gdzie zachodzą nie tylko znane już wcześniej (np. Parafiniuk 1996) dynamiczne przemiany samych siarczków w różnorodne minerały siarczanowe, ale również w strefach tych mają miejsce intensywne przemiany krzemianów warstwowych, a kierunki oraz finalne produkty transformacji tych minerałów zależą w dużym stopniu od właściwości środowiska wietrzenia (np. stopnia zakwaszenia i zawartości materii organicznej w glebach).

### 3. Zróżnicowanie gatunkowe glonów żyjących w kwaśnych wodach stref wietrzenia siarczków

We współpracy z biologami z Instytutu Botaniki PAN w Krakowie oraz Centrum Badań Ekologicznych PAN w Lublinie badano wpływ właściwości fizyko-chemicznych kwaśnych wód kopalnianych (ang. *acid mine drainage*, AMD) na zróżnicowanie gatunkowe mikroflory (Wołowski i in. 2013). Udział wnioskodawcy w tych badaniach polegał na określeniu właściwości wód, które były środowiskiem życia organizmów.

Badano glony żyjące w wodach z terenu nieczynnej kopalni pirytu w Wieściszowicach (Dolny Śląsk). Badano zarówno żywe organizmy pozyskane z wód, jak również za pomocą odpowiednich metod uzyskano koncentrat szczątków okrzemek oraz stomatocyst z osadów dennych. Wyseparowane okrzemki oraz stomatocysty były badane w skaningowym mikroskopie elektronowym w trybie obrazowania elektronów wtórnych w celu określenia ich morfologii, a na tej podstawie przyporządkowania ich do określonej grupy taksonomicznej.

Na podstawie właściwości chemicznych wyróżniono dwa typy wód: (1) silnie kwaśne ( $\text{pH} < 3$ ) charakteryzujące się wysokimi zawartościami rozpuszczonych siarczanów, glinu, żelaza, krzemionki i pierwiastków śladowych (np. Mn, Cu, Zn i Co), oraz (2) średnio kwaśne ( $\text{pH}$  od 4,0 do 4,8) cechującymi się znacznie mniejszymi koncentracjami wymienionych składników rozpuszczonych. W badanych wodach znaleziono w sumie 26 taksonów (okrzemki, nitkowate glony zielone, eugleniny oraz stomatocysty bruzdnic i złotowiciowców), z których najliczniej występowały okrzemki z gatunku *Eunotia exigua*. Osiemnaście ze zidentyfikowanych taksonów zostało po raz pierwszy znalezionych w kwaśnych wodach kopalnianych.

Badania wykazały, że najważniejszym czynnikiem wpływającym na zróżnicowanie gatunkowe mikroflory w badanych wodach jest ich  $\text{pH}$ . Zdecydowanie wyższym zróżnicowaniem gatunkowym charakteryzowały się wody średnio kwaśne (23 zidentyfikowane taksony) niż wody silnie kwaśne (11 taksonów). Innymi czynnikami

limitującymi różnorodność gatunkową jest temperatura wody, zawartość Fe, Al oraz pierwiastków śladowych, a także niedobór azotu i fosforu w wodach.

#### *4. Wpływ KWB „Bełchatów” na gospodarowanie przestrzenią rolniczą i klasyfikację gleb w bezpośrednim sąsiedztwie odkrywki kopalnianej*

Badano wpływ działalności Kopalni Węgla Brunatnego „Bełchatów” na właściwości gleb użytkowanych rolniczo (grunty orne i użytki zielone), a także analizowano zmiany, jakie zaszły w przestrzeni rolniczej na skutek intensywnego wydobycia węgla brunatnego metodą odkrywkową na przykładzie obrębu Łękińsko (gmina Kleszczów) sąsiadującego bezpośrednio z odkrywką KWB „Bełchatów” (Kurbiel i in. 2011). Analiza polegała na porównaniu danych zawartych na mapach i w operatach klasyfikacyjnych z 1959 roku (okres przed otwarciem KWB „Bełchatów”) z mapami i operatami zaktualizowanymi w 1998 roku, tj. około 20 lat po rozpoczęciu działalności przez kopalnię. W badaniach wykorzystano oprogramowanie komputerowe ArcGIS służące do analizy informacji o przestrzeni.

Znaczna część obrębu Łękińsko (27% powierzchni) uległa dewastacji wskutek powstania odkrywki, natomiast pozostała część znalazła się w zasięgu oddziaływania leja depresji. Powstanie leja depresji spowodowało na niezdeprawowanych obszarach obrębu Łękińsko obniżenie się poziomu wód gruntowych. Osuszenie wywołane obecnością leja spowodowało zmianę typu gospodarki wodnej gleb z przeważającej na tym obszarze gruntowo-wodnej na opadowo-retencyjną. W wyniku tego, siedliska roślinne i uprawy rolne w rejonie Łękińska uzależnione zostały od wody deszczowej i retencjonowanej w glebie, której zawartość może ulegać wahaniom. Powstanie leja depresji doprowadziło do degradacji gleb hydrogeniczných użytkowanych do momentu otwarcia KWB „Bełchatów” jako użytki zielone. Proces degradacji polegał na transformacji gleb torfowych w kierunku gleb mineralno-murszowatych i murszastych. Osuszenie gleb w niektórych przypadkach umożliwiło zamianę dawnych użytków zielonych na grunty orne.

Na obszarze obrębu Łękińsko prowadzono również badania, których celem było wskazanie najważniejszych problemów związanych z gleboznawczą klasyfikacją gruntów rolnych w rejonie oddziaływania leja depresji Kopalni Węgla Brunatnego „Bełchatów” (Uzarowicz i in. 2014). Analiza polegała na porównaniu danych dla wsi Łękińsko zawartych na mapach i w operatach klasyfikacyjnych z 1959 roku (okres przed otwarciem KWB „Bełchatów”) z mapami i operatami zaktualizowanymi w 1998 roku, tj. około 20 lat po rozpoczęciu działalności przez kopalnię. Z przeprowadzonych badań wynika, że jedynie 14% obszaru obrębu Łękińsko niezajętego przez kopalnię zostało objęte ponowną klasyfikacją gruntów w 1998 roku. Odkrywki glebowe zostały zlokalizowane wyłącznie na terenach, których użytkowanie zmieniło się w stosunku do stanu z 1959 r., z tym, że nie wszystkie nowo wyróżnione kontury glebowe były reprezentowane przez nowe odkrywki glebowe. Liczba odkrywek w stosunku do liczby nowo wydzielonych konturów klasyfikacyjnych wydaje się niewystarczająca. Zmiany klas bonitacyjnych po aktualizacji w 1998 roku dotyczyły tylko tych działek, na których w stosunku do roku 1959 zmieniło się użytkowanie, najczęściej z gruntów orných na użytki zielone. W ocenie autorów, zamiana klasy gruntu ornego (np. IIIa) na analogiczną klasę użytku zielonego (np. III) stosowana w trakcie aktualizacji mapy klasyfikacyjnej

nie zawsze jest prawidłowa, ze względu na zróżnicowaną rangę czynników decydujących o wyborze klasy bonitacyjnej dla gruntów ornyczych i użytków zielonych.

Na podstawie uzyskanych wyników autorzy sugerują, aby aktualizacji map klasyfikacyjnych dla obszarów objętych silnym odwodnieniem spowodowanym np. przez działalność kopalń odkrywkowych lub głęboką meliorację, nie ograniczać tylko do działek o zmienionym użytkowaniu, a wykonywać na całym obszarze przeznaczonym do aktualizacji. Aktualizacja każdego nowego konturu klasyfikacyjnego powinna być dokonywana w oparciu o odpowiednią liczbę odkrywek glebowych położonych w miarę możliwości w niedalekim sąsiedztwie w stosunku do odkrywek z pierwszej mapy klasyfikacyjnej, co umożliwiłoby porównywanie ich właściwości oraz analizę zmian, jakie zaszły w glebach w wyniku głębokiego odwodnienia. W trakcie aktualizacji mapy klasyfikacyjnej na terenach objętych głębokim odwodnieniem szczególną uwagę należy zwracać na rejony występowania gleb hydrogenicznych i semihydrogenicznych. Gleby te bowiem najsilniej reagują na zmiany wywołane obniżeniem się zwierciadła wód gruntowych, co przekłada się na ich właściwości, bonitację i przydatność rolniczą.

### *5. Badania gleboznawcze i hydrologiczne na Uralu Polarnym*

Badania te były efektem wypraw Koła Geografów Uniwersytetu Jagiellońskiego na Ural Polarny (Rosja), które miały miejsce latem 2006, 2007 i 2008 roku. Celem wypraw była jedna z dolin Uralu Polarnego położona w okolicach jezior Chadata-Jugan-Lor, na której terenie znajdował się lodowiec Obruczewa. Wnioskodawca uczestniczył w wyprawie w 2006 roku. Na miejscu przeprowadzono interdyscyplinarne badania i obserwacje z zakresu geologii, geomorfologii, meteorologii, hydrologii, gleboznawstwa i botaniki, które pozwoliły na zapoznanie się ze środowiskiem przyrodniczym wybranej części Uralu Polarnego (Uzarowicz i in. 2009).

Badania gleboznawcze były prowadzone przez wnioskodawcę latem 2006 roku. Skupiły się one głównie na rozpoznaniu pokrywy glebowej doliny z lodowcem Obruczewa. Wyróżnia ją niewielka ilość gleb torfowych (Histosols). Płatowo, zwłaszcza w zachodniej części badanego obszaru, występowały tam gleby kriogeniczne (Cryosols). Ich obecność przejawiała się na powierzchni terenu w postaci sieci kamienistych wieloboków lub gleb medalionowych mających postać owalnych gliniastych płatów. Większą część doliny zajmowały gleby inicjalne i słabo wykształcone, charakterystyczne dla obszarów górskich. Na niezwiertzałych skałach występowały litosole (Lithic Leptosols), zaś na stokach, często przemieszane przez procesy mrozowe i soliflukcję, regosole (Regosols, Leptosols). Sporadycznie w miejscach, gdzie nie działały intensywne ruchy mrozowe, na przesuszonych zwiertzelinach zachodził proces bielcowania i wykształciły się tzw. nanobielice (Podzols). U podnóży stoków powszechne były podmokłe gleby glejowe (Gleysols). W dnach dolin występowały mady (Fluvisols). W najbliższej okolicy lodowca były to mady pylaste, zaś dalej od lodowca i w bocznych ciekach – mady kamienisto-żwirowe.

W dolinie z lodowcem Obruczewa latem 2007 i 2008 roku przeprowadzono badania hydrochemiczne (Stachnik i Uzarowicz 2011), których celem była ilościowa i jakościowa charakterystyka zawartości substancji rozpuszczonych w ciekach wodnych w sezonie ablacyjnym z i bez pokrywy śnieżnej, z uwzględnieniem składu mineralnego skał i osadów występujących na badanym obszarze. Udział wnioskodawcy w tych badaniach polegał na określeniu składu mineralnego skał i osadów występujących w

zlewni potoku odwadniającego dolinę z lodowcem Obruczewa. Badania wykazały, że zawartość jonów rozpuszczonych w wodach była bardzo niska, co wskazuje, że tempo wietrzenia chemicznego skał podłoża jest niskie. Niskie tempo wietrzenia chemicznego związane jest z budową geologiczną (występowanie skał metamorficznych zawierających odporne na wietrzenie minerały krzemianowe i kwarc). Zauważono, że większa zawartość substancji rozpuszczonych w wodach występowała w okresie z topniejącą pokrywą śnieżną, co sugeruje udział pokrywy śnieżnej w denudacji chemicznej zlewni w obszarach peryglacialnych.

Badano również związek między wielkością odpływu w rzece proglacialnej odwadniającej dolinę z lodowcem Obruczewa, warunkami meteorologicznymi a procesami biogeochemicznymi (Stachnik i in. 2014). Podobnie jak powyżej (Stachnik i Uzarowicz 2011), udział wnioskodawcy w tych badaniach polegał na określeniu składu mineralnego skał i osadów występujących w zlewni potoku odwadniającego dolinę z lodowcem Obruczewa. Prace terenowe przeprowadzono w zlewni lodowca Obruczewa (13 km<sup>2</sup>) podczas okresu największego letniego natężenia przepływu w 2008 r. Odpływ rzeczny zdominowany był przez roztopy i wahał się w granicach od 3300 l·s<sup>-1</sup> do mniej niż 1000 l·s<sup>-1</sup>. Średnia dzienna temperatura powietrza w górskiej tundrze i w pobliżu lodowca Obruczewa od 11 lipca do 1 sierpnia 2008 wynosiła odpowiednio 14,4 i 10,3°C. Rzeka polodowcowa miała niskie zawartości substancji rozpuszczonych wahające się od 4,5 do 9 mg l<sup>-1</sup>, a współczynniki korelacji między Na<sup>+</sup> i Cl<sup>-</sup>, K<sup>+</sup> i Cl<sup>-</sup>, a także NH<sub>4</sub><sup>+</sup> i Cl<sup>-</sup> wynosiły odpowiednio 0,94, 0,90 i 0,84. Opady deszczu miały wpływ na inicjację topnienia śniegu i stanowiły zasadniczą część odpływu podczas intensywnego okresu roztopów, który nastąpił od 11 lipca do 18 lipca 2008 r. Dane pokazały, że Na<sup>+</sup> i K<sup>+</sup> w wodach powierzchniowych pochodziły ze śniegu, a nie z chemicznego wietrzenia krzemianów. Ponadto określono, że NO<sub>3</sub><sup>-</sup> pochodził z topniejącego pakietu śniegu, podczas gdy amonifikacja występująca pod śniegiem była głównym źródłem NH<sub>4</sub><sup>+</sup>.

## 6. Badania rozwoju węglanowych gleb rumoszowych w Pieninach

Badania zostały wykonane przez wnioskodawcę w ramach pracy magisterskiej pt. „Stadia rozwojowe rędzin rumoszowych *Calcaric Regosols* w Pieninach” (promotor: prof. dr hab. Stefan Skiba, opiekun: dr Andrzej Kacprzak) na kierunku geografia na Uniwersytecie Jagiellońskim. Celem badań było uzyskanie informacji na temat kierunku przemian i etapów rozwoju gleb rozwijających się na węglanowym materiale grubookruchowym w Pieninach w odniesieniu do rzeźby terenu i aktywności procesów morfogenetycznych (Kacprzak i in 2006). Badania prowadzono w zlewni Macelowego Potoku od granicy Pienińskiego Parku Narodowego po Kirową Skagę, gdzie zlokalizowano 5 odkrywek reprezentujących różne stadia rozwojowe gleb wykształconych z pokryw gruzowych.

Wyniki przeprowadzonych badań (Kacprzak i in 2006) wskazują na ścisły związek właściwości badanych gleb z procesami morfogenetycznymi, warunkującymi zarówno charakter substratu glebowego, jak i jego dalszą ewolucję (m.in. wielkość okruchów gruzowych, stopień i tempo wypełnienia pokrywy przez części ziemiste i materię organiczną). Na przeważającej powierzchni pokryw gruzowych (piargów, hałd usypiskowych) obserwuje się ich utrwalanie przez roślinność, zatem istniejące płyty mają charakter reliktowy, jednak punktowo w miejscach występowania świeżych obrywów skalnych obserwuje się również procesy odmładzające profile glebowe. Młody

i „surowy” materiał gruzowy, pochodzący z obrywów, praktycznie natychmiast zostaje objęty sukcesją roślinną i staje się glebą w rozumieniu jej funkcjonalnej definicji. Sprzyja temu naturalna zasobność w pierwiastki biogenne skały macierzystej oraz to, że w akumulowanym materiale znajduje się często glebowa substancja organiczna.

#### Literatura:

1. Arnalds O., 2008. Andosols. In: Chesworth, W. (Ed.), *Encyclopedia of Soils Science*, pp. 39–46.
2. Charzyński P., Bednarek R., Greinert A., Hulisz P., **Uzarowicz Ł.**, 2013. Classification of technogenic soils according to WRB system in the light of Polish experiences. *Soil Science Annual*, 64(4): 145-150.
3. IUSS Working Group WRB, 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. *World Soil Resources Reports No. 106*. FAO, Rome.
4. Kacprzak A., Drewnik M., **Uzarowicz Ł.**, 2006. Rozwój i kierunki przemian węglanowych gleb rumoszowych na terenie Pienińskiego Parku Narodowego (Development and transformation directions of talus carbonate soils in the Pieniny National Park). *Pieniny - Przyroda i Człowiek*, 9: 41-50.
5. Kurbiel M., **Uzarowicz Ł.**, Maciejewska A., 2011. Wpływ kopalnictwa odkrywkowego na gospodarowanie przestrzenią rolniczą w rejonie KWB „Bełchatów” (The influence of open-pit mining on agricultural space in the area of “Bełchatów” lignite mine). *Studia KPZK PAN*, 142: 351-355.
6. Parafiniuk J., 1996. Sulfate minerals and their origin in the weathering zone of the pyrite-bearing schists at Wieściszowice (Rudawy Janowickie Mts., Western Sudetes). *Acta Geologica Polonica*, 46, 353-414.
7. Soil Survey Staff, 2014. *Keys to Soil Taxonomy*, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
8. Stachnik Ł., **Uzarowicz Ł.**, 2011. The relationship between dissolved solids yield and the presence of snow cover in the periglacial basin of the Obruchev Glacier (Polar Urals) during the ablation season. *Quaestiones Geographicae*, 30(1): 95-103.
9. Stachnik Ł., Wałach P., **Uzarowicz Ł.**, Yde J., Tosheva Z., Wrońska-Wałach D., 2014. Water chemistry and hydrometeorology in a glacierized catchment in the Polar Urals, Russia. *Journal of Mountain Science*, 11(5): 1097-1111.
10. Systematyka Gleb Polski, 2011. *Roczniki Gleboznawcze – Soil Science Annual*, 62(3): 1–193.
11. Uehara G., 2005. Volcanic soils. In: Hillel, D. (Ed.), *Encyclopedia of Soils in the Environment*, pp. 225–232.
12. **Uzarowicz Ł.**, Skiba S., Skiba M., Michalik M., 2008. Mineral transformations in soils on spoil heaps of an abandoned pyrite mine in Wieściszowice (Rudawy Janowickie Mts., Lower Silesia). *Polish Journal of Soil Science*, 41/2: 183-193.
13. **Uzarowicz Ł.**, Łyp M., Wałach P., Wrońska-Wałach D., Płoskonka D., Stachnik Ł., Bregin M., Bajor K., 2009. Na Uralu Polarnym (In the Polar Ural Mts.). [In:] *Badania i podróże naukowe krakowskich geografów, tom IV*, (red. Z. Górka i J. Więclaw-Michniewska). Polskie Towarzystwo Geograficzne Oddział w Krakowie, Kraków: 73-83.
14. **Uzarowicz Ł.**, 2011. Technogenic soils developed on mine spoils containing iron sulfides in select abandoned industrial sites: Environmental hazards and reclamation possibilities. *Polish Journal of Environmental Studies*, 20(3): 771-782.
15. **Uzarowicz Ł.**, Skiba S., 2011. Technogenic soils developed on mine spoils containing iron sulphides: Mineral transformations as an indicator of pedogenesis. *Geoderma*, 163(1-2): 95-108.



16. **Uzarowicz Ł.**, Skiba S., Skiba M., Šegvić B., 2011. Clay-mineral formation in soils developed in the weathering zone of pyrite-bearing schists: A case study from the abandoned pyrite mine in Wieściszowice, Lower Silesia, Poland. *Clays and Clay Minerals*, 59(6): 581-594.
17. **Uzarowicz Ł.**, Maciejewska A., 2012. Ocena właściwości technogenicznych utworów glebowych Technosols zawierających siarczki żelaza (Assessment of properties of technogenic soils Technosols containing iron sulfides). *Roczniki Gleboznawcze - Soil Science Annual*, 63(3): 37-42.
18. **Uzarowicz Ł.**, Šegvić B., Michalik M., Bylina P., 2012. The effect of hydrochemical conditions and pH of the environment on phyllosilicate transformations in the weathering zone of pyrite-bearing schists in Wieściszowice (SW Poland). *Clay Minerals*, 47(4): 401-417.
19. **Uzarowicz Ł.**, 2013. Microscopic and microchemical study of iron sulphide weathering in a chronosequence of technogenic and natural soils. *Geoderma*, 197-198C: 137-150.
20. **Uzarowicz Ł.**, Skiba S., 2013. Technogenic soils developed from mine wastes containing iron sulphides in southern Poland. [In:] *Technogenic soils of Poland* (Ed. P. Charzyński, P. Hulisz, R. Bednarek), Polish Society of Soil Science, Toruń: 275-299.
21. **Uzarowicz Ł.**, Szafranek A., Kurbiel M., 2014. Problemy gleboznawczej klasyfikacji bonitacyjnej gruntów rolnych w zasięgu oddziaływania leja depresyjnego KWB „Bełchatów” (Problems with the soil classification and quality assessment of agricultural lands in the range of cone of depression around the “Bełchatów” open pit lignite mine (Poland)). *Soil Science Annual*, 65(4): 170-179.
22. **Uzarowicz Ł.**, Zagórski Z., 2015. Mineralogy and chemical composition of technogenic soils (Technosols) developed from fly ash and bottom ash from selected thermal power stations in Poland. *Soil Science Annual*, 66(2): 82-91.
23. **Uzarowicz Ł.**, Zagórski Z., Mendak E., Bartmiński P., Szara E., Kondras M., Oktaba L., Turek A., Rogoziński R., 2017. Technogenic soils (Technosols) developed from fly ash and bottom ash from thermal power stations combusting bituminous coal and lignite. Part I. Properties, classification, and indicators of early pedogenesis. *Catena*, 157C: 75-89.
24. **Uzarowicz Ł.**, 2018a. A sequence of Technosols developed from ashes from “Pątnów” and “Konin” thermal power stations (central Poland) combusting lignite. [In:] *Soil Sequences Atlas* (Ed. M. Świtoniak and P. Charzyński), Toruń: 217-228.
25. **Uzarowicz Ł.**, 2018b. A sequence of Technosols developed from ashes from the “Łaziska” thermal power station (southern Poland) combusting bituminous coal. [In:] *Soil Sequences Atlas* (Ed. M. Świtoniak and P. Charzyński), Toruń: 229-243.
26. **Uzarowicz Ł.**, Skiba M., Leue M., Zagórski Z., Gąsiński A., Trzciński J., 2018a. Technogenic soils (Technosols) developed from fly ash and bottom ash from thermal power stations combusting bituminous coal and lignite. Part II. Mineral transformations and soil evolution. *Catena* 162C: 255-269.
27. **Uzarowicz Ł.**, Kwasowski W., Śpiewak O., Świtoniak M., 2018b. Indicators of pedogenesis of Technosol developed in an ash settling pond at the Bełchatów thermal power station (central Poland). *Soil Science Annual*, 69(1): 49-59.
28. Wołowski K., **Uzarowicz Ł.**, Łukaszek M., Pawlik-Skowrońska B., 2013. Diversity of algal communities in acid mine drainages of different physico-chemical properties. *Nova Hedwigia*, 97(1-2): 117-137.