



**UNIwersytet  
MIKOŁAJA KOPERNIKA  
W TORUNIU**

Wydział Nauk o Ziemi  
i Gospodarki Przestrzennej

**mgr Sylwia Pindral**

**Wpływ materiałów technogenicznych na strukturę  
przestrzenną i właściwości gleb Inowrocławia**

Rozprawa doktorska

Promotor:  
dr hab. Piotr Hulisz, prof. UMK

TORUŃ 2022

*Swoje największe podziękowania pragnę złożyć promotorowi pracy doktorskiej, Panu Profesorowi Piotrowi Huliszowi za lata poświęcone na realizowanie projektu doktorskiego, za cenne uwagi, naukę jaką otrzymałam w trakcie studiów doktoranckich oraz cierpliwość i wyrozumiałość w trakcie opracowywania wyników badań i publikowania artykułów.*

*Panu Profesorowi Rafałowi Kotowi dziękuję za współpracę, cenne wskazówki i uwagi merytoryczne podczas przygotowywania artykułów. Dziękuję również za zainteresowanie mnie zagadnieniem różnorodności gleb oraz godziny konsultacji, podczas których powstawały nowe pomysły poprawiające wartość publikacji.*

*Panu dr Łukaszowi Mendykowi dziękuję za pomoc w pracach terenowych i przygotowaniu pobranych próbek do analiz laboratoryjnych. Panom dr Adamowi Michalskiemu i mgr Michałowi Dąbrowskiemu dziękuję za pomoc w pracach terenowych i nieocenione wsparcie w analizach właściwości gleb w Laboratorium Analiz Środowiskowych.*

*Pani Profesor Renacie Bednarek dziękuję za cenne uwagi dotyczące zagadnień związanych z kartografią i klasyfikacją gleb.*

*Pani Profesor Agnieszce Piernik dziękuję za pomoc i wskazówki w przygotowaniu analiz statystycznych.*

*Współautorom publikacji wchodzących w skład rozprawy doktorskiej, w szczególności Panu Profesorowi Przemysławowi Charzyńskiemu, dziękuję za wkład włożony w badania i przygotowania manuskryptów. Dziękuję również wszystkim pracownikom Wydziału Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej UMK w Toruniu za wszelką okazaną mi pomoc.*

*Swoje szczególne podziękowania pragnę złożyć Panu Profesorowi Marcinowi Świtoniakowi za pierwsze zajęcia z gleboznawstwa, dzięki którym zrodziła się we mnie pasja do nauki o glebach oraz Pani dr hab. Bożenie Smreczak za wsparcie w ostatnim etapie publikowania wyników badań.*

*Swoim przyjaciółkom dziękuję za ciągłe wsparcie, pomoc i budowanie pewności siebie.*

*Bez Was nie mogłabym realizować pracy naukowej i trwać w swoich postanowieniach.*

*Najbliższej rodzinie dziękuję za wsparcie i pomoc przez ostatnie lata spędzone na studiach doktoranckich. Z kolei rodzicom dziękuję za wpojenie szacunku do środowiska przyrodniczego i nauki. Dziękuję, że w gronie najważniejszych dla mnie osób mogę realizować swoje marzenia i plany z myślą, że rodzina i przyjaciele zawsze będą mnie w tym wspierać.*

*Niniejszą pracę dedykuję rodzicom*

## SPIS TREŚCI

LISTA PUBLIKACJI WCHODZĄCYCH W SKŁAD ROZPRAWY DOKTORSKIEJ .....	5
STRESZCZENIE.....	7
ABSTRACT.....	9
WSTĘP .....	11
CEL BADAŃ I ZAŁOŻENIA BADAWCZE .....	13
METODY BADAŃ.....	14
WYNIKI I DYSKUSJA.....	17
WNIOSKI .....	20
LITERATURA.....	22
ZAŁĄCZNIK NR 1: ARTYKUŁ P1.....	27
ZAŁĄCZNIK NR 2: MATERIAŁY DODATKOWE DO ARTYKUŁU P1 .....	43
ZAŁĄCZNIK NR 3: ARTYKUŁ P2.....	49
ZAŁĄCZNIK NR 4: MATERIAŁY DODATKOWE DO ARTYKUŁU P2 .....	63
ZAŁĄCZNIK NR 5: ARTYKUŁ P3.....	73
ZAŁĄCZNIK NR 6: MATERIAŁY DODATKOWE DO ARTYKUŁU P3 .....	87
ZAŁĄCZNIK NR 7: OŚWIADCZENIA WSPÓŁAUTORÓW.....	95
ZAŁĄCZNIK NR 8: ŻYCIORYS NAUKOWY.....	107





## LISTA PUBLIKACJI WCHODZĄCYCH W SKŁAD ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

**P1. Pindral S.,** Kot R., Hulisz P., Charzyński P., 2020, Landscape metrics as a tool for urban pedodiversity analysis. *Land Degradation and Development*, 31, 16: 2281-2294. <https://doi.org/10.1002/ldr.3601>.

**P2. Pindral S.,** Kot R., Hulisz P., 2022, The influence of city development on urban pedodiversity. *Scientific Reports*, 12, 6009. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09903-5>.

**P3. Pindral S.,** Kot R., Malinowska A., Hulisz P., 2023, The effect of technogenic materials on fine-scale soil heterogeneity in a human-transformed landscape. *Catena*, 106772. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106772>.

Lp.	IF (w roku publikacji)	Punktacja MNiSW
P1	4,377	200
P2	4,996	140
P3	6,367	140
<b>Razem</b>	<b>15,74</b>	<b>480</b>

We wszystkich wymienionych publikacjach doktorantka jest pierwszą autorką, a w publikacjach P1 oraz P2 autorką korespondencyjną. Udział doktorantki w każdej z prac wynosi odpowiednio: P1 – 45%, P2 – 50% oraz P3 – 50% (Załącznik nr 7).



## **STRESZCZENIE**

Gleby miejskie stanowią specyficzną grupę gleb, która dotychczas była stosunkowo słabo badana pod względem analiz przestrzennych. Pedogeneza i ewolucja gleb miejskich zależy głównie od pochodzenia i typu materiałów technogenicznych, które są powszechnie definiowane jako materiały skonstruowane lub silnie przekształcone przez działalność człowieka. Pomimo wielu publikacji na ten temat, problem różnorodności (heterogeniczności) gleb w obszarach miejskich jest nadal niedostatecznie rozpoznany. Szczególnie dotyczy to stworzenia ujednocionej metodyki badań.

Celem badań było określenie wpływu materiałów technogenicznych na strukturę przestrzenną i właściwości gleb Inowrocławia. Biorąc pod uwagę wielofunkcyjność oraz wielowiekową historię tego miasta, założono, że materiały technogeniczne mogą być istotnym czynnikiem powodującym różnorodność gleb. Do realizacji celu posłużyły trzy zadania badawcze: (i) opracowanie jakościowo-ilościowej metody do oceny różnorodności gleb z zastosowaniem metryk krajobrazowych, (ii) wykonanie map zmienności czasowo-przestrzennej gleb miejskich oraz (iii) wykonanie szczegółowej analizy heterogeniczności gleb wybranego obszaru miasta. W analizach wykorzystano dane pochodzące ze źródeł kartograficznych (map topograficznych, tematycznych), numerycznego modelu terenu, a także własnych badań terenowych i laboratoryjnych.

W pierwszej z prac (Pindral i in. 2020 – P1) zaproponowano metodę opartą na wykorzystaniu oryginalnego wskaźnika różnorodności gleb (Pedodiversity Index - PI), obliczanego na podstawie statystycznie uzasadnionego wyboru kilku metryk krajobrazowych (PR – Liczba Klas/Typów, TE – Długość Granic, SHEI – Indeks Równomierności Shannona, SIEI – Indeks Równomierności Simpsona). Jest to podejście nowatorskie, które dotychczas nie było wykorzystywane w badaniach gleb miejskich. Na podstawie map różnorodności gleb (PI) precyzyjnie wskazano obszary o największej fragmentacji krajobrazu, a tym samym gleb najsilniej przekształconych przez człowieka, często pierwotnie o wysokiej wartości użytkowej.

W kolejnej publikacji (Pindral i in. 2022 – P2) przeprowadzono analizę czasowo-przestrzenną zmian pokrywy glebowej w odniesieniu do rozwoju przestrzennego miasta Inowrocławia w latach 1934-2016 z zastosowaniem wymienionej wyżej

autorskiej metody. Zidentyfikowano i opisano przestrzenne wzorce zmian pokrywy glebowej, które ściśle odzwierciedlały kolejne etapy rozwoju miasta oraz sukcesywną depozycję materiałów technogenicznych, jak i obszary problemowe wymagające rewitalizacji i wprowadzenia zasad zrównoważonego rozwoju.

Ostatnią z prac (Pindral i in. 2023 – P3) poświęcono szczegółowej analizie heterogeniczności gleb technogenicznych na wytypowanym obszarze problemowym z wykorzystaniem badań terenowych i laboratoryjnych. Stwierdzono, że rzeczywista różnorodność gleb jest znacząco wyższa niż wskazują na to rezultaty analiz przestrzennych, opartych wyłącznie na metodach kartograficznych.

Reasumując, należy stwierdzić, że materiały technogeniczne powstałe wskutek rozwoju miasta Inowrocławia oraz wielokierunkowej działalności człowieka miały kluczowy wpływ na transformację pierwotnie mało zróżnicowanej pokrywy glebowej miasta. Wraz ze wzrostem stopnia przekształcenia gleb wzrastała ich przestrzenna różnorodność.

## **ABSTRACT**

Urban soils are a specific group of soils that have so far been relatively poorly studied in terms of spatial analysis. The pedogenesis and evolution of urban soils depend mainly on the origin and type of technogenic materials, which are commonly defined as materials constructed or heavily transformed by human activities. Despite many publications related to this topic, the problem of pedodiversity (heterogeneity) in urban areas is still insufficiently recognized. This is especially relevant to the development of a unified research methodology.

The research aimed to analyse the influence of technogenic materials on the spatial structure and properties of soils in the city of Inowrocław. Due to the multifunctionality and over eight hundred years of city history, it was assumed that technogenic materials might significantly contribute to pedodiversity. Three research tasks were undertaken: (i) development of a qualitative-quantitative method for pedodiversity assessment using landscape metrics, (ii) creating maps of spatio-temporal variability of urban soils, and (iii) performing a detailed analysis of soil heterogeneity within a selected area in the city. Various cartographic data (topographic and thematic maps), digital terrain model, as well as field measurements, and laboratory analyses were used in the study.

The first paper (Pindral et al. 2020 - P1) presents a method that relies on the use of the original Pedodiversity Index (PI), calculated based on a statistically justified selection of several landscape metrics (PR – Patch Richness, TE – Total Edge, SHEI - Shannon's Evenness Index, SIEI - Simpson's Evenness Index). This novel approach has not been used so far in urban soil studies. Based on soil diversity maps (PI), the areas with the highest landscape fragmentation, and thus soils strongly transformed by human activity were identified precisely.

In the second paper (Pindral et al. 2022 - P2), a spatial and temporal analysis of changes in soils was carried out concerning the spatial development of the city of Inowrocław from 1934 to 2016, using the method applied in the first publication. Spatial patterns of soil transformation were identified and described. These patterns closely reflected the stages of the city's development and the successive deposition of technogenic materials, as well as the identification of problem areas requiring revitalization and the implementation of the sustainable development plan.

The third paper (Pindral et al. 2023 - P3) presents the results of a detailed analysis of the technogenic soils' heterogeneity in the selected problem area. Cartographic, field, and laboratory studies were applied. It was found that the real diversity of soils was significantly higher than indicated by the results of spatial analyses based solely on cartographic methods.

Summing up, it should be stated that technogenic materials deposited during the development of the city of Inowrocław and multidirectional human activity had a crucial impact on the transformation of the soil cover which was originally poorly diversified. Along with the increase in the degree of soil transformation, the pedodiversity increased.

## WSTĘP

Gleby miejskie stanowią specyficzną grupę gleb, która dotychczas była stosunkowo rzadko badana pod względem analiz przestrzennych. Geneza i ewolucja gleb miejskich zależy głównie od pochodzenia i typu materiałów technogenicznych (Séré i in. 2010; Huot i in. 2015), które są powszechnie definiowane jako materiały wytworzone lub silnie przekształcone przez człowieka (IUSS Working Group WRB 2022). Zróżnicowanie materiału macierzystego oraz użytkowanie terenu mają duże odzwierciedlenie w przestrzennej i pionowej heterogeniczności gleb miejskich (Greinert 2015). W obrębie profili glebowych obserwuje się występowanie materiału technogenicznego obejmujących gruz budowlany (Greinert 2015; Hulisz i in. 2018a), popioły ze stacji ciepłych lub rafinerii (Santini i Fey 2015; Uzarowicz i Zagórski 2015), odpady komunalne i przemysłowe (Bartkowiak i in. 2016; Uzarowicz i Skiba 2013), asfalt, nawierzchnie betonowe, geomembrany w ekranosolach (Charzyński i in. 2011). Inną grupą materiałów technogenicznych są odpady ciekłe (w tym solanki i słone ścieki, związki ropopochodne), które silnie przyczyniają się do zmian właściwości fizycznych i chemicznych gleb oraz powstawania warstw technogenicznych (Hulisz i in. 2018b). Ponadto przekształcenia gleb mogą być spowodowane zanieczyszczeniami powietrza (aerozolami i pyłem), szczególnie w dużych miastach lub w sąsiedztwie terenów przemysłowych. Ze względu na powyższe przekształcenia gleby miejskie mogą być klasyfikowane jako odrębne typy czy inne jednostki glebowe.

Chociaż badania gleb miejskich stają się coraz powszechniejsze, dotyczą one głównie kwestii związanych z klasyfikacją, właściwościami i oceną jakości gleb. Analiza przestrzenna gleb miejskich nie jest tak często stosowana, jak badania poszczególnych jednostek glebowych. W Polsce istnieje stosunkowo niewiele kompleksowych opracowań kartograficznych dla miast. Jako przykłady można wymienić: Toruń (Charzyński i in. 2013; Charzyński i in. 2017), Zieloną Górę (Greinert 2003; Greinert 2015), Kraków (Skiba i in. 2008) oraz Wrocław (Kabała i Chodak, 2002).

Różnorodność (heterogeniczność) gleb definiuje się jako zmienność właściwości gleb lub ich typów na określonym obszarze (Ibáñez i in. 1995; McBratney i Minasny 2007). Gleby występujące na obszarach zurbanizowanych charakteryzują się wysoką poziomą (horyzontalną) i pionową (wertykalną)

heterogenicznością właściwości ze względu na występowanie różnych typów przekształceń, nagromadzenia materiałów technogenicznych różnego pochodzenia oraz zróżnicowanych kierunków pedogenezy. Jak sugeruje wielu autorów (np. Ibáñez i in. 1998; Samec i in. 2018), skuteczną metodą analizy różnorodności (heterogeniczności) gleb jest wykorzystanie metryk krajobrazowych. Są to wskaźniki, które określają strukturę przestrzenną krajobrazu w oparciu o kształt lub powierzchnię jego poszczególnych wydzieleni (w tym przypadku jednostek gleb). Dzięki tej metodzie możliwa jest obiektywna analiza struktury krajobrazu oraz przestrzenny rozkład jego różnorodności (Richling 2012; Kot 2018). Pomimo wielu publikacji na ten temat, problem różnorodności (heterogeniczności) gleb w obszarach miejskich jest nadal niedostatecznie rozpoznany. Szczególnie dotyczy to opracowania ujednoliconej metodyki badań.



## **CEL BADAŃ I ZAŁOŻENIA BADAWCZE**

Celem badań było określenie wpływu materiałów technogenicznych na strukturę przestrzenną i właściwości gleb Inowrocławia. Biorąc pod uwagę wielofunkcyjność oraz wielowiekową historię tego miasta, założono, że materiały technogeniczne mogą być istotnym czynnikiem powodującym różnorodność gleb. Realizacja celu obejmowała trzy główne zadania badawcze: (i) opracowanie jakościowo-ilościowej metody do oceny różnorodności gleb z zastosowaniem metryk krajobrazowych, (ii) wykonanie map zmienności czasowo-przestrzennej gleb miejskich oraz (iii) wykonanie szczegółowej analizy heterogeniczności gleb wybranego obszaru miasta.

Opracowanie map różnorodności gleb miejskich jest konieczne do obiektywnej analizy krajobrazu miejskiego. Metryki krajobrazowe oraz mapy różnorodności gleb mogą być cennym narzędziem w planowaniu przestrzennym miasta oraz zarządzaniu miejskim zasobami glebowymi. Wykorzystując wskaźniki różnorodności, możliwe jest także zlokalizowanie obszarów silnie przekształconych i zdegradowanych z glebami takimi jak: Spolic Technosols, Urbic Technosols oraz Ekranic Technosols (IUSS Working Group WRB 2022).

## **METODY BADAŃ**

Inowrocław jest miastem średniej wielkości, o ponad 800-letniej historii, położonym na Kujawach, na Równinie Inowrocławskiej (mezoregion 315.55; Richling i in. 2021), w województwie kujawsko-pomorskim (52°40' N; 18°16' E). Inowrocław swój rozwój zawdzięcza złożom cechsztyńskiej soli kamiennej, dzięki którym już po koniec XIX wieku funkcjonował on jako duży ośrodek przemysłu górniczego, chemicznego oraz uzdrowisko (Biskup 1978; Biskup 1982).

W obrębie miasta dominują utwory czwartorzędowe, głównie gliny zwałowe, z których wytworzyły się czarne ziemie – gleby o wysokiej wartości użytkowej. W związku z rozwojem przemysłu, zabudowy mieszkaniowo-usługowej, infrastruktury drogowej i kolejowej znaczny obszar cennych z punktu widzenia rolnictwa gleb został zdegradowany. W południowej części miasta występują gleby zasolone, powstałe w wyniku oddziaływania odpadów przemysłu sodowego (Piernik i in. 2015; Hulisz i in. 2018b).

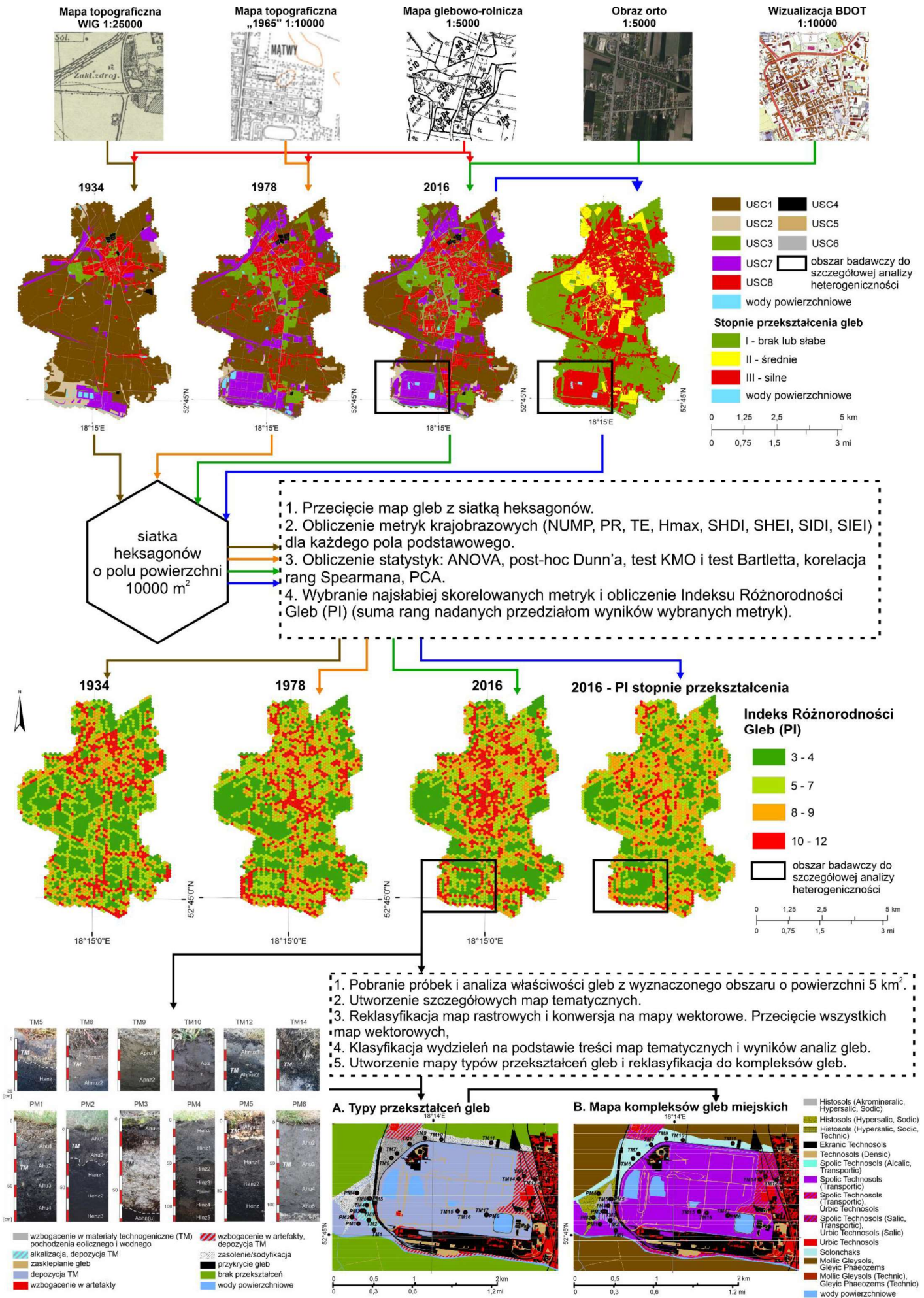
Wybór Inowrocławia jako obszaru badawczego wydaje się optymalny ze względu stosunkowo niewielką powierzchnię (30,42 km<sup>2</sup>), wielowiekową historię osadnictwa, wielofunkcyjność, a także jednorodną naturalną (pierwotną) pokrywę glebową.

Schemat graficzny podejścia badawczego został przedstawiony na Ryc. 1. Prace składały się z trzech głównych etapów, tj.: opracowania metody służącej ocenie różnorodności gleb na obszarze miasta, zastosowania tej metody do oceny czasowo-przestrzennej zmienności pokrywy glebowej oraz szczegółowej analizy heterogeniczności gleb w wybranym obszarze problemowym.

W badaniach (publikacje P1 i P2) przetestowano nowatorską, autorską metodę oceny różnorodności gleb miejskich z wykorzystaniem metryk krajobrazowych. Analizy pedoróżnorodności dla okresu 1934-2016 wykonano w odniesieniu do map kompleksów gleb miejskich (USCs). Dla roku 2016 opracowano także mapę stopnia przekształceń gleb (publikacja P1). Wykorzystano różne źródła danych: mapę topograficzną Wojskowego Instytutu Geograficznego w skali 1:25000 (1934), mapę topograficzną w układzie „1965” w skali 1:10000 (1978), a także bazę danych BDOT (Bank Danych Obiektów Topograficznych) w skali 1:10000 oraz ortofotomapę (2016). Na tej podstawie opracowano mapy pokrycia i użytkowania terenu, które zostały przecięte z mapą glebowo-rolniczą

w skali 1:5000, a następnie zreklasyfikowane zgodnie z klasyfikacją WRB (IUSS Working Group WRB 2015). Po sprawdzeniu topologii oraz korekcie geometrii, warstwy wektorowe zostały przecięte z siatką heksagonów o powierzchni pola podstawowego wynoszącym 10000 m<sup>2</sup>. Dla każdego pola podstawowego i każdej z czterech przygotowanych map obliczono osiem metryk krajobrazowych (publikacje P1 i P2). W celu uniknięcia redundancji danych, po przeprowadzonych analizach statystycznych (ANOVA, analiza post-hoc Dunn'a, współczynnik Kaisera-Meyera-Olkina, test sferyczności Bartleta, korelacja rang Spearmana oraz Analiza Składowych Głównych (PCA)) wybrano cztery najściślej skorelowane metryki krajobrazowe (PR – Liczba Klas/Typów, TE – Długość Granic, SHEI – Indeks Równomierności Shannona, SIEI – Indeks Równomierności Simpsona)

i za pomocą metody bonitacji punktowej obliczono Indeks Różnorodności Gleb (Pedodiversity Index - PI). Do szczegółowej analizy heterogeniczności gleb wybrano obszar badawczy o powierzchni 5 km<sup>2</sup> (publikacja P3). Na podstawie wcześniejszych badań stwierdzono, że jest to obszar, w którym technogeniczne transformacje gleb zachodzą najbardziej intensywnie oraz wpływ materiałów technogenicznych na gleby jest najsilniejszy. Podczas badań terenowych pobrano próbki z sześciu profili glebowych (PM1-PM6) oraz siedemnastu płytkich odkrywek (TM1-TM17). W próbkach gleb oznaczono: zawartość frakcji szkieletowej ( $\varphi > 2$  mm), pH w H<sub>2</sub>O i w 1M KCl, zawartość węgla organicznego (TOC), azotu całkowitego (TN), CaCO<sub>3</sub> oraz przewodność elektryczną (EC<sub>e</sub>), zawartość jonów sodu (Na<sup>+</sup>), wapnia (Ca<sup>2+</sup>) i magnezu (Mg<sup>2+</sup>) w ekstrakcie pasty nasyconej. Obliczone zostały także wskaźnik adsorpcji sodu (SAR) i procentowy udział sodu wymiennego (ESP) (Van Reeuwijk 2002). Na podstawie treści z wybranych map tematycznych i wyników analiz laboratoryjnych gleb opracowano mapę przekształceń gleb, którą następnie zreklasyfikowano do mapy kompleksów gleb zgodnie z klasyfikacją WRB 2015 (IUSS Working Group WRB 2015).



Ryc. 1. Graficzny schemat metodyki badań

## WYNIKI I DYSKUSJA

W pierwszej z prac (publikacja P1) zaproponowano metodę opartą na wykorzystaniu autorskiego wskaźnika różnorodności gleb (Pedodiversity Index - PI), obliczanego na podstawie statystycznie uzasadnionego wyboru kilku metryk krajobrazowych (PR – Liczba Klas/Typów, TE – Długość Granic, SHEI – Indeks Równomierności Shannona, SIEI – Indeks Równomierności Simpsona). Jest to podejście nowatorskie, które dotychczas nie było wykorzystywane w badaniach gleb miejskich.

Uzyskane wyniki wykazały, że pokrywa glebowa miasta Inowrocławia jest bardzo zróżnicowana. Na obszarach o najwyższej różnorodności (PI 9,5-12) dominowały kompleksy gleb najsilniej przekształconych: Ekranic Technosols (USC6) i Urbic Technosols, Mollic Gleysols (Technic) (USC8). Natomiast tereny przemysłowe, na których dominowały Spolic Technosols (Salic, Sodic), Mollic Gleysols (Technic), Mollic Gleysols (Salic, Sodic), Garbic Spolic Technosols (Humic) (USC7), charakteryzowały się stosunkowo małą fragmentacją przestrzenną, co można tłumaczyć występowaniem dużych i jednorodnych płatów. Silne i średnie przeobrażenia gleb zaobserwowano na ponad 55% powierzchni miasta. Z kolei na obszarach o najmniejszej różnorodności gleb (PI 3,0–4,5), gdzie dominował jeden kompleks gleb miejskich (np. Mollic Gleysols, Gleyic Phaeozems - USC1), dominowała najniższa klasa przekształceń gleb. Wykazano, że pomimo względnej jednorodności naturalnej (pierwotnej) pokrywy glebowej obszaru badawczego, wskutek rozwoju miasta i licznych przekształceń, współczesne gleby Inowrocławia charakteryzują się wysoką heterogenicznością.

Zastosowanie nowatorskiej metody analizy różnorodności dla Inowrocławia, miasta multifunkcjonalnego, którego pierwotna struktura przestrzenna była stosunkowo homogeniczna, pozwoliło na precyzyjne wskazanie obszarów występowania gleb silnie przekształconych przez człowieka i obszarów degradacji gleb o wysokiej wartości użytkowej oraz identyfikację zależności pomiędzy strukturą kompleksów gleb miejskich a różnorodnością gleb (publikacja P1). Dotychczasowe badania struktury przestrzennej gleb miejskich opierały się jedynie na opracowaniu map typów, kompleksów lub asocjacji gleb (np. Charzyński i Hulisz 2017; Sobocká i in. 2021), map prawdopodobieństwa występowania gleb technogenicznych (np. Van de Vijver i in. 2020) lub były częścią analiz

georóżnorodności (Ilić i in. 2016). Ze względu na wykorzystanie publicznych baz danych, metodę można zastosować do analiz na obszarach innych ośrodków miejskich i miejsko-przemysłowych.

Duże zróżnicowanie przestrzenne gleb miejskich jest wynikiem ingerencji człowieka w środowisko przyrodnicze, związanej z historycznym i aktualnym użytkowaniem gruntów. Jak wynika z analizy wykonanej dla okresu 1934-2016 (publikacja P2), największe zmiany pokrywy glebowej Inowrocławia związane były głównie z przekształceniem obszarów o najbardziej żyznych glebach (Mollic Gleysols i Gleyic Phaeozems, USC1-2) w grunty przeznaczone do celów innych niż rolnictwo, tj. budownictwo, przemysł i obszary zieleni miejskiej (USC3-8). W wyniku czego całkowita utrata gleb użytkowanych rolniczo przekroczyła 14 km<sup>2</sup>, co stanowi prawie 1/3 obecnej powierzchni miasta. Na podstawie analizy map kompleksów gleb miejskich (USCs) i różnorodności gleb (PI) stwierdzono, że zmiany pokrycia terenu i zasięgu występowania poszczególnych jednostek gleb w dwóch badanych okresach (1934–1978 i 1978–2016) istotnie wpłynęły na wzrost różnorodności gleb w mieście. Udział najwyższych wartości PI wahał się od 15,9% w 1934 r., 17,3% w 1978 r. do 20,9% w 2016 r.

Jednakże na niektórych obszarach obserwowano spadek różnorodności gleb. Fakt ten można tłumaczyć procesami klasteryzacji zabudowy, które mają wpływ na zmniejszenie udziału terenów zieleni i gleb kompleksu USC3 (Hortic Anthrosols, Mollic Gleysols (Technic), Gleyic Phaeozems (Technic), Hortic Phaeozems) w centralnych dzielnicach miasta. Gleby te świadczą szereg usług ekosystemowych, dlatego też tworzenie nowych terenów zieleni miejskiej jest szczególnie istotne dla obszarów o zwartej zabudowie lub obszarów przemysłowych, których funkcjonowanie oddziałuje negatywnie na środowisko (Adhikari i Hartemink 2006; Morel i in. 2014). W celu poprawy warunków środowiskowych na tych obszarach, szczególnie na nieużytkach, gruntach zdegradowanych lub zdewastowanych, lub na istniejącej zabudowie (ogrody wertykalne, ogrody na dachach) można zaprojektować i utworzyć nowe tereny zieleni (Martinico i in. 2014; Szymańska i in. 2015; Fan i in. 2017). Takie rozwiązania mogłyby się przyczynić do poprawy mikroklimatu, warunków życia mieszkańców i estetyki miasta. W związku z powyższym opracowanie czasowo-przestrzennego modelu zmian różnorodności może być rekomendowane do monitoringu krajobrazu oraz określania usług



ekosystemowych w planowaniu urbanistycznym i krajobrazowym oraz zarządzaniu środowiskiem.

Reasumując, w publikacjach P1 i P2 wykazano, że wartości Wskaźnika Różnorodności Gleb (Pedodiversity Index - PI) charakteryzowały się dużą zmiennością przestrzenną i czasową. Zastosowane podejście pozwoliło na zidentyfikowanie zarówno kierunków zmian przestrzennych pokrywy glebowej, które ściśle odzwierciedlały kolejne etapy rozwoju miasta Inowrocławia, jak i obszarów problemowych wymagających rewitalizacji i realizacji zasad zrównoważonego rozwoju.

W związku z silnym oddziaływaniem przemysłu na transformację gleb w Inowrocławiu, wykonano szczegółowe analizy właściwości oraz struktury przestrzennej gleb na testowym obszarze badawczym. Wyniki badań opublikowane w trzecim artykule (publikacja P3) potwierdziły, że obecność materiałów technogenicznych była kluczowym czynnikiem różnicującym badane gleby. Na blisko 70% powierzchni obszaru stwierdzono liczne przemiany technogeniczne gleb, takie jak zasolenie, sodyfikacja, silna alkalizacja, obecność artefaktów, depozycja materiałów technogenicznych, wzbogacenie w materiały technogeniczne pochodzenia eolicznego i wodnego, zasklepienie i przykrycie gleb. Właściwości gleb przekształconych i sztucznie utworzonych przez człowieka znacznie różniły się od właściwości gleb słabo przekształconych i nieprzekształconych (publikacja P3: Ryc. 3., Tab. 4., Załącznik 6: Tab. A.1.).

Wysoka heterogeniczność badanych gleb potwierdzona została wynikami analiz statystycznych. Wyniki hierarchicznej analizy skupień (publikacja P3: Ryc. 5) wskazały, że większość analizowanych gleb miała poziomy występujące w różnych zbiorach/klastrach. W związku z tym należy stwierdzić, że aktualna pokrywa glebowa wybranego obszaru była niejednorodna, a właściwości gleb były silnie zróżnicowane. Cechę tę należy uznać za typową dla gleb miejskich, co potwierdzają także badania innych autorów (np. Mao i in. 2014, Greinert 2015, Hulisz i in. 2018b, Delbecque i in. 2022). Mapy gleb (publikacja P3: Ryc. 6.) przedstawiały niejednorodną mozaikę gleb, w której największy udział stanowiła grupa referencyjna Technosols (IUSS Working Group WRB 2015). Gleby te zajmowały ponad 60% powierzchni obszaru badań. Ze względu na występowanie różnych typów przekształceń i warunków środowiskowych, kontury gleb klasyfikowanych

jako Technosols zostały dodatkowo opisane z użyciem różnych kombinacji kwalifikatorów: *Alkalic*, *Densic*, *Ekranic*, *Salic*, *Sodic*, *Spolic*, *Transportic* i *Urbic* (publikacja P3: Ryc. 6.B, Załącznik 6: Tab. A.2.).

Gleby powstałe na skutek wielokierunkowej działalności człowieka charakteryzowały się wysoką heterogenicznością zarówno w układzie poziomym, jak i pionowym. Wyniki badań jednoznacznie wskazały, że uzyskanie wiarygodnego obrazu różnorodności gleb miejskich w szczegółowej skali jest skomplikowane i czasochłonne. Niemniej jednak wykonywanie map gleb miejskich, w szczególności map różnorodności oraz analiza właściwości gleb to techniki, które wzajemnie się uzupełniają, umożliwiając identyfikację zarówno obecnych, jak i historycznych czynników prowadzących do przekształceń gleb i powstawania gleb technogenicznych.

Przeprowadzone badania potwierdziły, że analiza różnorodności gleb miejskich jest bardzo złożona i trudna do jednoznacznej interpretacji. Wysokie wskaźniki bioróżnorodności oraz różnorodności gleb, które nie uległy przekształceniom mają pozytywny wpływ na jakość gleby oraz jej świadczenia ekosystemowe (Stolte i in. 2015; Komisja Europejska 2021). Zwiększona różnorodność gleb przekształconych w wyniku działalności człowieka może natomiast być wskaźnikiem degradacji gleb i skutkować znacznym ograniczeniem ich funkcji (Adhikari i Hartemink 2006; Morel i in. 2014).

## **WNIOSKI**

Na podstawie uzyskanych wyników potwierdzono hipotezę rozprawy doktorskiej. Materiały technogeniczne powstałe wskutek rozwoju miasta Inowrocławia oraz wielokierunkowej działalności człowieka miały kluczowy wpływ na transformację pierwotnie mało zróżnicowanej pokrywy glebowej miasta. Wraz ze wzrostem stopnia przekształcenia gleb wzrastała ich przestrzenna różnorodność.

Autorska metoda analizy różnorodności (heterogeniczności) gleb miejskich z zastosowaniem metryk krajobrazowych pozwoliła na identyfikację obszarów, na których wystąpiło największe rozdrobnienie krajobrazu, a tym samym precyzyjne wskazanie gleb najsilniej przekształconych i strat gleb cennych z punktu widzenia rolnictwa. Dlatego też mapy kompleksów gleb miejskich i różnorodności



gleb mogą być cennymi narzędziami wspomagającymi działania planistyczne w przestrzeni miejskiej.

Zastosowane podejście czasowo-przestrzenne pozwoliło na zidentyfikowanie i charakterystykę przestrzennych wzorców zmian pokrywy glebowej, które ściśle odzwierciedlały kolejne etapy rozwoju miasta oraz sukcesywną depozycję materiałów technogenicznych. Na tej podstawie możliwe było także wskazanie obszarów problemowych wymagających rewitalizacji i wprowadzenia zasad zrównoważonego rozwoju.

Problem kartowania gleb miejskich należy rozpatrywać wielokierunkowo. Badania szczegółowe udowodniły, że techniki analiz wertykalnej i horyzontalnej heterogeniczności gleb wzajemnie się uzupełniają, umożliwiając skuteczną ocenę wpływu materiałów technogenicznych na strukturę przestrzenną i właściwości gleb.

Istniejące opracowania kartograficzne ze względu na specyfikę gleb miejskich nie pozwalają na wiarygodną analizę ich heterogeniczności w skali topicznej.

Na podstawie szczegółowych badań terenowych i laboratoryjnych wykazano, że rzeczywista różnorodność gleb w wytypowanym obszarze problemowym jest znacząco wyższa niż wskazują na to rezultaty analiz przestrzennych, opartych wyłącznie na metodach kartograficznych.

W świetle przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników, należy stwierdzić, że opracowane podejście badawcze ma dużą wartość aplikacyjną i może być wykorzystane do analiz pokrywy glebowej różnej wielkości miast i ośrodków miejsko-przemysłowych, dla których dostępne są zharmonizowane bazy danych, m. in. Urban Atlas (<https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas>). Wymaga to jednak dalszych badań.

## LITERATURA

1. Adhikari, K., Hartemink, A.E., 2006. Linking soils to ecosystem services: A global review. *Geoderma*, 262, 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>.
2. Bartkowiak, A., Lemanowicz, J., Siwik-Ziomek, A., 2016. Assessment of selected heavy metals and enzymes in soil within the range of impact of illegal dumping sites. *Int. J. Environ. Res.* 10, 2, 245–254.
3. Biskup, M., 1978. *Dzieje Inowrocławia: T. 1. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.*
4. Biskup, M., 1982. *Dzieje Inowrocławia: T. 2. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.*
5. Charzyński, P., Bednarek, R., Świtoniak, M., Żołnowska, B., 2011. Ekranic Technosols and Urbic Technosols of Toruń Necropolis. *Geologija*, 53, 4, 179–185.
6. Charzyński, P., Bednarek, R., Hulisz, P., Zawadzka, A., 2013. Soils within Toruń urban area. [w:] Charzyński P., Hulisz, P., Bednarek, R. (Red.) *Technogenic soils of Poland. Polish Society of Soil Science, Toruń*, 275-299.
7. Charzyński, P., Hulisz, P., 2017. The case of Toruń, Poland. [w:] Levin, M. L. i in. (Red.) *Soils within Cities Global approaches to their sustainable management: Composition, properties and functions of soils of the urban environment. Schweizerbart Science Publisher*, 123–128.
8. Delbecque, N., Dondeyne, S., Gelaude, F., Mouazen, A.M., Vermeir, P., Verdoodt, A., 2022. Urban soil properties distinguished by parent material, land use, time since urbanization, and pre-urban geomorphology, *Geoderma*, 413, 115719. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115719>.
9. Fan, P., Xu, L., Yue, W., Chen, J., 2017. Accessibility of public urban green space in an urban periphery: The case of Shanghai. *Landsc. Urban Plan.*, 165, 177–192. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.11.007>.
10. Greinert A., 2003. *Studia nad glebami obszaru zurbanizowanego Zielonej Góry. Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego. ISBN 83-89321-38-6.*
11. Greinert, A., 2015. The heterogeneity of urban soils in the light of their properties. *J. Soils Sediments*, 15, 8, 1725–1737. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-1054-6>.

12. Hulisz, P., Charzyński, P., Greinert, A., 2018a. Urban soil resources of medium-sized cities in Poland: A comparative case study of Toruń and Zielona Góra. *J. Soils Sediments*, 18, 2, 358–372. <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1596-x>.
13. Hulisz, P., Pindral, S., Kobierski, M., Charzyński, P., 2018b. Technogenic layers in organic soils as a result of the impact of the soda industry. *Eurasian Soil Sci.*, 51, 1133–1141. <https://doi.org/10.1134/S1064229318100046>.
14. Huot, H., Simonnot, M.O., Morel, J.L., 2015. Pedogenetic Trends in Soils Formed in Technogenic Parent Materials. *Soil Sci.*, 180, 4, 5, 182–192. DOI: 10.1097/SS.0000000000000135. hal-01594174.
15. Ibáñez, J.J., De Alba, S., Boixadera, J., 1995. The pedodiversity concept and its measurement: Application to soil information systems. [w:] King, D. i in. (Red.) *European Land Information System for Agro-Environmental Monitoring*. European Commission, 181–195.
16. Ibáñez, J.J., De Alba, S., Lobo, A., Zucarello, V., 1998. Pedodiversity and global soil patterns at coarse scales (with discussion). *Geoderma*, 83, 3–4, 171–192. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00147-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00147-X).
17. Ilić, M.M., Stojković, S., Rundić, L., Čalić, J., Sandić, D., 2016. Application of the geodiversity index for the assessment of geodiversity in urban areas: An example of the Belgrade city area, Serbia. *Geol. Croat.*, 69, 3, 325–336. <https://doi.org/10.4154/gc.2016.27>.
18. IUSS Working Group WRB, 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.
19. IUSS Working Group WRB, 2022. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria.
20. Kabała, C., Chodak, T., 2002. *Gleby*. [w:] Smolnicki, K., Szykasiuk, M. (Red.) *Informator o stanie środowiska Wrocławia*. Dolnośląska Fundacja Ekorozwoju, Wrocław. ISBN: 83-916884-2-9.
21. Komisja Europejska, 2021. Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady Europejskiej, Rady, Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. Strategia UE na rzecz ochrony gleb 2030. Korzyści ze zdrowych gleb dla ludzi, żywności, przyrody i klimatu. Bruksela, COM(2021) 699 final.
22. Kot, R., 2018. A comparison of results from geomorphological diversity evaluation methods in the Polish lowland (Toruń Basin and Chełmno Lakeland).

Geogr. Tidsskrift Danish J. Geogr., 118, 1, 17–35.  
<https://doi.org/10.1080/00167223.2017.1343673>.

23. Mao, Q., Huang, G., Buyantuev, A., Wu, J., Luo, S., Ma, K., 2014. Spatial heterogeneity of urban soils: the case of the Beijing metropolitan region, China, *Ecol. Process.*, 3, 23. <https://doi.org/10.1186/s13717-014-0023-8>.

24. Martinico, F., La Rosa, D., Privitera, R., 2014. Green oriented urban development for urban ecosystem services provision in a medium sized city in southern Italy. *For. Biogeosci. For.*, 7, 6, 422–432.  
<https://doi.org/10.3832/for1171-007>.

25. McBratney, A.B., Minasny, B., 2007. On Measuring Pedodiversity. *Geoderma*, 141, 149–154. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.05.012>.

26. Morel, J.L., Chenu, C., Lorenz, K., 2014. Ecosystem services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining, and military areas (SUITMAs). *J. Soils Sediments*, 15, 1659–1666. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0926-0>.

27. Piernik, A., Hulisz, P., Rokicka, A., 2015. Micropattern of halophytic vegetation on technogenic soils affected by the soda industry. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 61, 98–112.  
<https://doi.org/10.1080/00380768.2015.1028874>.

28. Pindral, S., Kot, R., Hulisz, P., Charzyński, P., 2020. Landscape metrics as a tool for analysis of urban pedodiversity. *Land Degrad. Dev.*, 31, 16, 2281–2294.  
<https://doi.org/10.1002/ldr.3601>.

29. Pindral, S., Kot, R., Hulisz, P., 2022. The influence of city development on urban pedodiversity. *Sci. Rep.*, 12, 6009. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09903-5>.

30. Pindral S., Kot R., Malinowska A., Hulisz P., 2023. The effect of technogenic materials on fine-scale soil heterogeneity in a human-transformed landscape, *Catena*, 106772. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106772>.

31. Richling A., Solon J., Macias A., Balon J., Borzyszkowski J., Kistowski M. (Red.) 2021. Regionalna geografia fizyczna Polski. Bogucki Wyd. Naukowe, Poznań.

32. Samec, P., Voženílek, V., Vondráková, A., Macku, J. 2018. Diversity of forest soils and bedrock in soil regions of the central-European highlands (Czech Republic). *Catena*, 160, 95–102. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.09.007>.

33. Santini, T.C., Fey, M.V., 2015. Fly ash as a permeable cap for tailings management: pedogenesis in bauxite residue tailings. *J. Soils Sediments*, 15, 552–564. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-1038-6>

34. Séré, G. Schwartz, C., Ouvrard, S., Renat, J.-C., Watteau, F., Villemain, G., Morel, J.L., 2010. Early pedogenic evolution of constructed Technosols. *J. Soils Sediments*, 10, 1246–1254. <https://doi.org/10.1007/s11368-010-0206-6>.
35. Skiba S., Drewnik M., Szymański W. Żyła M., 2008. Mapa Gleb Miasta Krakowa. Uniwersytet Jagielloński, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Zakład Gleboznawstwa i Geografii Gleb, Kraków. <http://www.gleby.geo.uj.edu.pl/mapy.html> (dostęp: 22-11-2022).
36. Sobocká, J., Saksa, M., Feranec, J., Szatmári, D., Holec, J., Bobál'ová, H., Rášová, A., 2021. Mapping of urban environmentally sensitive areas in Bratislava city. *J. Soils Sediments* 21, 2059–2070. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02682-4>.
37. Stolte, J., Tesfai, M., Øygarden, L., Kværnø, S., Keizer, J., Verheijen, F., Panagos, P., Ballabio, C., Hessel, R., 2015. Soil threats in Europe. EUR 27607 EN. doi:10.2788/828742.
38. Szymańska, D., Lewandowska, A., Rogatka, K., 2015. Temporal trend of green areas in Poland between 2004 and 2012. *Urban For. Urban Greening*, 14, 1009–1016. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.09.008>.
39. Uzarowicz Ł., Skiba S., 2013. Technogenic soils developed from mine wastes containing iron sulphides in southern Poland. [w:] Charzyński P., Hulisz, P., Bednarek, R. (Red.) *Technogenic soils of Poland*. Polish Society of Soil Science, Toruń, 275-299.
40. 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 Sci. Ann.*, 66, 2, 82-91. DOI: 10.1515/ssa-2015-0023.
41. Van De Vijver E., Delbecq N., Verdoodt A. , Seuntjens P., 2020. Estimating the urban soil information gap using exhaustive land cover data: The example of Flanders, Belgium. *Geoderma*, 372, 114371. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114371>.
42. Van Reeuwijk, L., 2002. Technical Paper 09: Procedures for Soil Analysis, 6th ed. ISRIC, Wageningen, The Netherlands, FAO, Rome, Italy, pp. 119. ISBN 90-6672-044-1.





**UNIWERSYTET  
MIKOŁAJA KOPERNIKA  
W TORUNIU**

Wydział Nauk o Ziemi  
i Gospodarki Przestrzennej

**ZAŁĄCZNIK NR 1: ARTYKUŁ P1**

Pindral S., Kot R., Hulisz P., Charzyński P., 2020,  
Landscape metrics as a tool for urban pedodiversity analysis.  
Land Degradation and Development, 31, 16, 2281-2294,  
<https://doi.org/10.1002/ldr.3601>.

# Landscape metrics as a tool for analysis of urban pedodiversity

Sylwia Pindral<sup>1</sup>  | Rafał Kot<sup>2</sup> | Piotr Hulisz<sup>1</sup> | Przemysław Charzyński<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Department of Soil Science and Landscape Management, Faculty of Earth Sciences and Spatial Management, Nicolaus Copernicus University, Toruń, Poland

<sup>2</sup>Department of Geomorphology and Quaternary Paleogeography, Faculty of Earth Sciences and Spatial Management, Nicolaus Copernicus University, Toruń, Poland

## Correspondence

Sylwia Pindral, Department of Soil Science and Landscape Management, Faculty of Earth Sciences and Spatial Management, Nicolaus Copernicus University, Toruń, Poland.  
Email: syl.pindral@gmail.com

## Abstract

Landscape metrics play an important role in pedodiversity studies. Despite considerable research on pedodiversity, there is a lack of standardised methods for assessing the degree of soil cover diversity, especially in the urban area. Hence, in this work, we propose a new approach for spatial analyses of the urban soils using landscape metrics. The aim of the study was to develop a qualitative–quantitative landscape-metrics-based method for the pedodiversity measurement and the degree of soils' transformation. The research included: selection of input data (cartographic materials), data digitisation, development of an urban soil map and a soil transformation map, creation of a hexagonal grid within the city's administrative boundaries, calculation of eight landscape metrics and their statistical selection, and finally, development of the maps based on original pedodiversity index. Despite the homogeneous initial soil cover of the city, the present, human-transformed soil cover is relatively heterogeneous by urban soil complexes and the degree of soil transformation. The developed method allows areas of greatest landscape fragmentation to be identified, and thereby to precisely indicate the areas of the most strongly human-transformed soils and fertile soil losses, which can support urban spatial planning and landscape design.

## KEYWORDS

medium-sized city, soil classification, soil mapping, spatial analysis, urban soils





**UNIWERSYTET  
MIKOŁAJA KOPERNIKA  
W TORUNIU**

Wydział Nauk o Ziemi  
i Gospodarki Przestrzennej

**ZAŁĄCZNIK NR 3: ARTYKUŁ P2**

Pindral S., Kot R., Hulisz P., 2022,  
The influence of city development on urban pedodiversity.  
Scientific Reports, 12, 6009,  
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-09903-5>.



OPEN

# The influence of city development on urban pedodiversity

Sylvia Pindral<sup>1✉</sup>, Rafał Kot<sup>2</sup> & Piotr Hulisz<sup>1✉</sup>

The aim of this study was to use a pedodiversity index (PI) to assess changes in the spatial structure of soil cover in Inowrocław, Poland during the twentieth and twenty-first centuries. An original cartographic approach based on landscape metrics was implemented using GIS techniques and statistical calculations. Based on maps of urban soil complexes and pedodiversity, it was revealed that land and soil cover changes in two studied periods (1934–1978 and 1978–2016) significantly affected pedodiversity in the city. In general, the spatio-temporal increase of the pedodiversity index was observed. The percentage of highest values of the PI ranged from 15.9% in 1934, 17.3% in 1978 to 20.9% in 2016. We revealed that pedodiversity index (PI) values are highly spatially and temporally variable and are associated with urban development and changes in the city's internal structure. The applied approach allowed for the identification of both spatial patterns of changes in soil cover that closely reflect the successive stages of the city's development, and problem areas that require revitalization and the implementation of the principles of sustainable development. Therefore, the proposed method can be recommended for landscape monitoring and in determining ecosystem services in urban and landscape planning, and environmental management.

<sup>1</sup>Faculty of Earth Sciences and Spatial Management, Department of Soil Science and Landscape Management, Nicolaus Copernicus University in Toruń, Lwowska 1, 87-100 Toruń, Poland. <sup>2</sup>Faculty of Earth Sciences and Spatial Management, Department of Geomorphology and Quaternary Paleogeography, Nicolaus Copernicus University in Toruń, Lwowska 1, 87-100 Toruń, Poland. ✉email: syl.pindral@gmail.com; hulisz@umk.pl

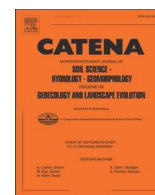


**UNIWERSYTET  
MIKOŁAJA KOPERNIKA  
W TORUNIU**

Wydział Nauk o Ziemi  
i Gospodarki Przestrzennej

**ZAŁĄCZNIK NR 5: ARTYKUŁ P3**

Pindral S., Kot R., Malinowska A., Hulisz P., 2022  
The effect of technogenic materials on fine-scale soil heterogeneity in a human-  
transformed landscape.  
Catena, 106772.  
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106772>.



## The effect of technogenic materials on fine-scale soil heterogeneity in a human-transformed landscape

Sylwia Pindral<sup>a</sup>, Rafał Kot<sup>b</sup>, Anna Malinowska<sup>a</sup>, Piotr Hulisz<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Department of Soil Science and Landscape Management, Faculty of Earth Sciences and Spatial Management, Nicolaus Copernicus University in Toruń, Poland

<sup>b</sup> Department of Geomorphology and Quaternary Paleogeography, Faculty of Earth Sciences and Spatial Management, Nicolaus Copernicus University in Toruń, Poland

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Soil diversity  
SUITMAs  
Industrial soils  
Soda industry  
Urban soil mapping

### ABSTRACT

In this study, we aimed to investigate how the occurrence of technogenic materials affects the fine-scale heterogeneity of soil properties. Five km<sup>2</sup> of an urban industrial area (Inowrocław, north-central Poland) was selected for the study. The presented approach involves both field and laboratory soil studies and the use of publicly available cartographic materials and digital databases. It was shown that the presence of technogenic materials was the key factor in differentiating the studied soils. Numerous technogenic transformations of soils such as salinization, sodification, strong alkalization, enrichment with artifacts, deposition of technogenic materials, eolian and water supply of technogenic materials, compaction, and sealing were found across nearly 70% of the research area's surface. As a result, specific vertical and lateral soil patterns were found that differed from those of soils that were anthropically untransformed or slightly transformed. This study shows that a reliable picture of soil diversity on a detailed scale is complicated and time-consuming to obtain in urban and industrial areas. Nevertheless, the mapping of the horizontal spatial distribution of soil transformations and the examination of samples taken vertically from soil profiles are techniques that complement each other, allowing both present and past soil-transforming factors to be identified.

\* Corresponding author.

E-mail address: [hulisz@umk.pl](mailto:hulisz@umk.pl) (P. Hulisz).

<https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106772>

Received 12 April 2022; Received in revised form 23 October 2022; Accepted 6 November 2022

Available online 17 November 2022

0341-8162/© 2022 Elsevier B.V. All rights reserved.