

Raport z testu badawczego dotyczącego zagrożenia powodziowego poprzez modelowanie podnoszenia się zwierciadła wody podziemnej i poziomu gruntu osuwiska położonego w gminie Bolesław (powiat olkuski) z wykorzystaniem metody LiDAR i metody interferometrycznej

*1. Plan badawczy zawierający przebieg badań z podziałem na prace terenowe i laboratoryjne, wraz ze wskazaniem kolejnych kroków przebiegu prac badawczych*

#### Prace terenowe

- identyfikacja obszarów od nie dawna wypełnionych wodą,
- identyfikacja obszarów potencjalnie objętych wynoszeniem gruntu wynikającym z podnoszenia się zwierciadła wody podziemnej,
- analiza terenowa stref potencjalnie objętych wynoszeniem gruntu obszarów potencjalnie objętych wynoszeniem gruntu wynikającym z podnoszenia się zwierciadła wody podziemnej,
- identyfikacja stref i punktów które potencjalnie mogą być źródłem sygnału dla interferometrii radarowej,
- Identyfikacja strefy która powinna zostać objęta analizami z wykorzystaniem technologii LiDAR
- określenie granic, w których zostanie przeprowadzona analiza interferometryczna.
- określenie granic, w których zostanie przeprowadzona analiza LiDAR.

#### Prace laboratoryjne

- wyznaczenie okresu w którym przeprowadzona zostanie analiza LiDAR,
- wyznaczenie okresu w którym przeprowadzona zostanie analiza interferometryczna,
- wyznaczenie przedziałów czasowych dla których przeprowadzona zostanie analiza interferometryczna,
- wyznaczenie przedziałów czasowych dla których przeprowadzona zostanie analiza LiDAR,
- wyznaczenie przedziałów wynoszenia gruntu spowodowanego podnoszeniem zwierciadła wody podziemnej dla których przeprowadzona zostanie analiza interferometryczna,
- wyznaczenie przedziałów wynoszenia gruntu spowodowanego podnoszeniem zwierciadła wody podziemnej dla których przeprowadzona zostanie analiza LiDAR,
- wyznaczenie ilości punktów dla których przeprowadzona zostanie analiza interferometryczna,
- zaplanowanie przedstawienia typów grafik obrazujących zmiany powierzchni gruntu z wykorzystaniem interferometrii radarowej,

- zaplanowanie przedstawienia typów grafik obrazujących zmiany powierzchni gruntu z wykorzystaniem obrazów LiDAR,
- Wybór punktów w których przeprowadzona zostanie szczegółowa analiza zmian powierzchni gruntu na podstawie analizy interferometrycznej.

## *2. Opis przebiegu prac badawczych z uwzględnieniem założeń teoretycznych, opisu metody, ewentualnego poboru prób w terenie i kolejnych kroków prac laboratoryjnych.*

### Założenia teoretyczne (LiDAR)

LiDAR jest technologią teledetekcyjną, która wykorzystuje impulsy laserowe do bardzo dokładnego określania odległości pomiędzy sensorem a powierzchnią Ziemi. Jego działanie polega na wysyłaniu krótkich wiązek światła laserowego oraz pomiarze czasu, po jakim wracają one po odbiciu od obiektów. Na tej podstawie powstaje niezwykle precyzyjna trójwymiarowa chmura punktów odwzorowująca teren. System LiDAR może być montowany na samolotach, dronach, satelitach oraz pojazdach poruszających się po powierzchni ziemi. Jedną z kluczowych zalet tej technologii jest zdolność do częściowego „przenikania” przez pokrywę roślinną, co pozwala na odwzorowanie rzeczywistej rzeźby terenu. Dzięki temu LiDAR znajduje szerokie zastosowanie w analizie zmian zachodzących na powierzchni Ziemi. Umożliwia on obserwację procesów erozyjnych, osuwisk, deformacji terenu oraz skutków działalności człowieka. Analiza danych LiDAR pochodzących z różnych okresów pozwala precyzyjnie określić tempo oraz kierunek tych zmian. W kontekście zagrożenia powodziowego technologia ta umożliwia tworzenie bardzo dokładnych numerycznych modeli terenu. Modele te są niezbędne do symulowania przepływu wody oraz wyznaczania obszarów narażonych na zalanie. Wysoka rozdzielczość danych pozwala na uwzględnienie koryt rzecznych oraz niewielkich form terenu. Na podstawie tych informacji można ocenić wpływ zmian ukształtowania terenu na rozprzestrzenianie się wód powodziowych oraz zalewania terenów zapadających się. LiDAR wspomaga również planowanie przestrzenne oraz projektowanie systemów ochrony przeciwpowodziowej. W rezultacie technologia ta stanowi niezwykle istotne narzędzie w zarządzaniu środowiskiem oraz ograniczaniu skutków powodzi.

### Założenia teoretyczne (interferometria radarowa)

Prace badawcze obejmowały modelowanie wykorzystującym interferometrię radarową, czyli technikę teledetekcyjną służącą do bardzo precyzyjnego pomiaru zmian powierzchni Ziemi. Metoda ta polega na analizie różnic fazy fal radarowych emitowanych i odbieranych przez satelitę. Satelita wykonuje zobrazenia radarowe tego samego obszaru w różnych momentach czasowych lub z lekko odmiennych pozycji orbitalnych. Zestawienie tych obrazów pozwala utworzyć interferogram, który przedstawia zróżnicowanie fazy sygnału. Różnice fazowe są

konsekwencją zmian odległości pomiędzy satelitą a powierzchnią terenu. Zmiany te mogą wynikać z ruchów podłoża, takich jak osiadanie, unoszenie się gruntu czy aktywność sejsmiczna. Interferometria radarowa umożliwia detekcję przemieszczeń o wielkości nawet kilku milimetrów. Technika ta jest niezależna od warunków oświetlenia oraz pogody i znajduje szerokie zastosowanie w geologii, geodezji oraz monitorowaniu zagrożeń naturalnych. Pozwala ona na długookresową obserwację deformacji powierzchni Ziemi na rozległych obszarach.

Interferometria radarowa daje również możliwość analizy wynoszenia terenu poprzez dokładny pomiar zmian wysokości powierzchni Ziemi w czasie. Proces ten może być związany z podnoszeniem się poziomu wód podziemnych w warstwach wodonośnych. Z tego względu badanie unoszenia gruntu, na przykład w wyniku wzrostu zwierciadła wód podziemnych spowodowanego działalnością górnictwem, może być traktowane jako element analizy zagrożeń powodziowych. Satelity radarowe rejestrują wielokrotne obrazy tego samego obszaru w kolejnych okresach, a porównanie fazy sygnału umożliwia wykrycie nawet bardzo niewielkich zmian odległości między satelitą a terenem. Wzrost poziomu wód podziemnych powoduje zwiększenie ciśnienia porowego, co prowadzi do rozszerzania się osadów i skał, a w efekcie do unoszenia powierzchni gruntu. Zjawisko to jest rejestrowane przez interferometrię radarową jako systematyczna zmiana fazy sygnału. Analiza długich sekwencji interferogramów pozwala określić tempo tego procesu, który często przebiega powoli i równomiernie, co sprzyja jego identyfikacji metodami InSAR. Szczególnie skuteczne są techniki wieloczasowe, takie jak PS-InSAR oraz SBAS, które umożliwiają redukcję wpływu atmosfery i zakłóceń sygnału. Dzięki nim uzyskuje się wiarygodne mapy przemieszczeń pionowych terenu. Wyniki analiz InSAR mogą być porównywane z danymi z piezometrów rejestrujących poziom wód podziemnych, a zgodność czasowa obu zjawisk potwierdza ich związek przyczynowy. Interferometria radarowa umożliwia jednoczesną analizę procesów zachodzących na dużych obszarach, co ma szczególne znaczenie w regionach o skomplikowanych warunkach hydrogeologicznych. Dane satelitarne stanowią podstawę do modelowania hydrogeologicznego i geomechanicznego, a interferometria radarowa jest skutecznym narzędziem monitorowania wpływu zmian poziomu wód podziemnych na wynoszenie powierzchni terenu.

Przeprowadzony test środowiskowy obejmuje strefę położoną w gminie Bolesław, około 6 km na północny zachód od Olkusza (Rycina 1A). Analizę interferometryczną zmian powierzchni gruntu przeprowadzono dla okresu 2019-2023, dane interferometryczne dotyczące tego okresu są ogólnodostępne. Z kolei analizę porównawczą LiDAR przeprowadzono dla okresów 2014-2024 i 2019-2023. Porównano także model terenu pozyskany z danych LiDAR z ortofotomapą. Szczegółowe analizy interferometryczne zostały uwzględnione dla kolejnych następujących dni: 08.03.2019, 12.06.2019, 16.09.2019, 21.12.2019, 26.03.2020, 30.06.2020, 04.10.2020, 03.03.2021, 07.06.2021, 11.09.2021, 16.12.2021, 22.03.2022, 26.06.2022, 30.09.2022, 03.11.2023, 15.06.2023, 19.09.2023. Analiza szczegółowa objęła analizę 4 punktów terenowych położonych w różnych strefach obszaru objętego testem środowiskowym. Dla każdego z 4 punktów przedstawiono grafikę obrazującą zmiany powierzchni gruntu spowodowane zmianami zwierciadła wody podziemnej. Opracowano także grafiki dla obrzązów LiDAR celem identyfikacji obszarów zapadających się i wynoszonych.

### *3. Wyniki badań w postaci obliczeniowej wraz z niezbędną dokumentacją w postaci tabel, wykresów i rysunków*

#### Interferometria radarowa

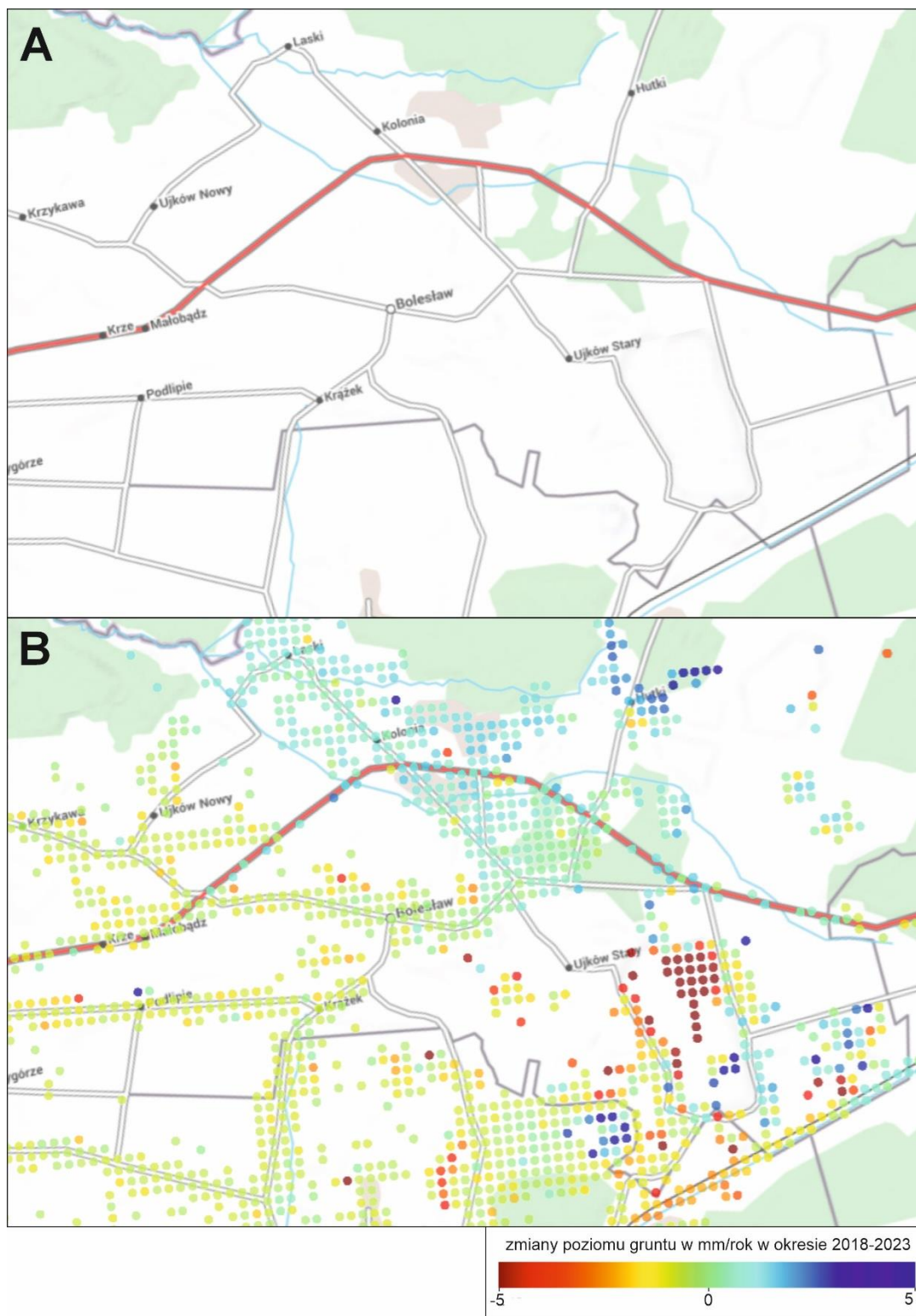
Punkty, w których prowadzono analizę zmian powierzchni terenu, zlokalizowane były głównie na obszarach zabudowanych. Na terenach leśnych oraz łąkowych nie było możliwe wyznaczenie punktów charakteryzujących się stałym odbiciem sygnału, dlatego na mapie B (Rycina 1) punkty wykorzystane w analizach interferometrii radarowej nie występują równomiernie na całym przedstawionym obszarze i nie obejmują stref niezabudowanych.

W początkowym etapie analizy przyjęto bardzo niski próg zmian powierzchni terenu, wynoszący 5 mm/rok (Rycina 1B). Uzyskane wyniki wskazują na ogólną tendencję podnoszenia się powierzchni gruntu, co z dużym prawdopodobieństwem jest związane z odbudową zwierciadła wód podziemnych. Zjawisko to jest szczególnie wyraźne w północnej oraz południowo-wschodniej części badanego obszaru, gdzie dominują punkty oznaczone kolorem ciemnoniebieskim i niebieskim (Rycina 1B). Natomiast w centralnej części analizowanego terenu obserwuje się obniżanie powierzchni gruntu, reprezentowane przez punkty czerwone, żółte i zielone. Największe wartości obniżania się powierzchni terenu, zaznaczone kolorem czerwonym, występują w rejonie hałdy z kopalni Bolesław prawdopodobnie jest to efektem współczesnych prac prowadzonych w obrębie tej hałdy. Analiza danych interferometrycznych przedstawionych na rycinie 1B pokazuje, że w latach 2019–2023 tempo wynoszenia terenu na większości obszaru nie przekraczało 5 mm/rok. Świadczy o tym przewaga punktów o jasnoniebieskim zabarwieniu. Jedynie w pojedynczych lokalizacjach na południu oraz północnym wschodzie analizowanego obszaru zidentyfikowano osiadanie przekraczające wartość 5 mm/rok.

W następnej kolejności analizowano przemieszczenia pionowe gruntu wynoszące 10 mm/rok (Rycina 2C). Jedynie kilka punktów analizowanych na mapie osiągnęło wartość wynoszenia 10 mm/rok, o czym świadczy rzadkie występowanie punktów barwy ciemnoniebieskiej. Punkty, które wskazują na wynoszenie terenu o wartości nieznacznie wyższej od 10 mm/rok, występują jedynie w południowej części badanego obszaru. Jednak na mapie prezentującej wynoszenie gruntu o wartości do 20 mm/rok żaden z punktów nie osiąga granicznego tempa osiadania (Rycina 2D). Co oznacza, że maksymalne wynoszenie wynikające z analizy interferometrycznej badanego obszaru wynosi 10-15 mm/rok.

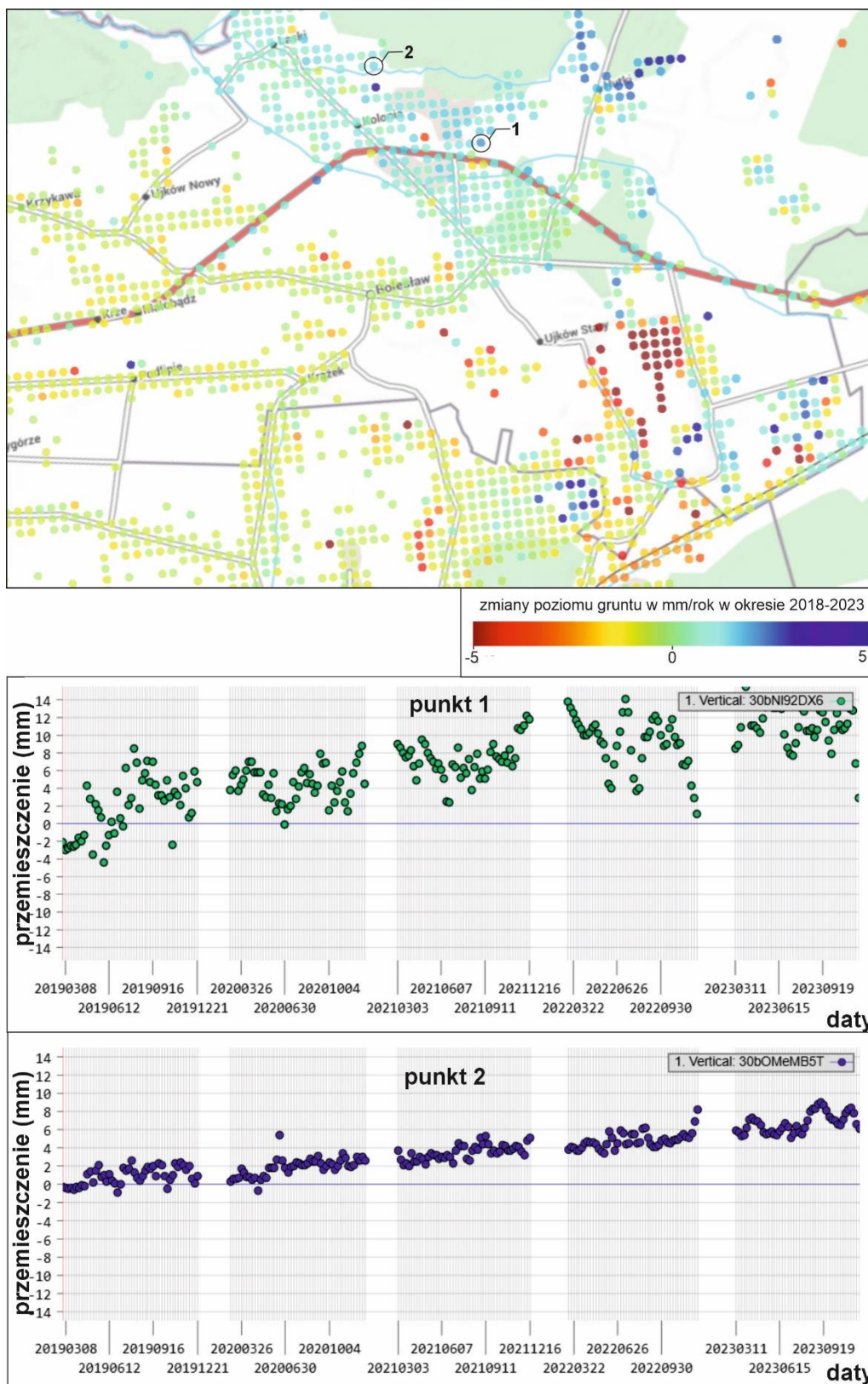
Szczegółowych danych dostarcza analiza zmian wysokości poszczególnych punktów wybranych na analizowanym obszarze (Rycina 3 i 4). Do analizy wybrano dwa punkty, w których wynoszenie gruntu było reprezentatywne dla całej strefy wynoszonej, położonej w północnej części badanego obszaru (punkty 1 i 2). Punkt 1 w ciągu 5 lat (2019-2023), został wyniesiony o około 12-14 mm, z kolei punkt 2 o został wyniesiony o 10-12 mm. W przypadku obu punktów wynoszenie miało w przybliżeniu jednostajne tempo. Analizowano także punkty położone w pobliżu zalanej obwodnicy Bolesławia (punkty 3 i 4). W punkcie 3 zidentyfikowano nieznaczne osiadanie terenu osiagające 4 mm w latach 2019-2023 (Rycina 4), z kolei w punkcie 4 osiadanie było większe i wyniosło 30 mm. W przypadku punktu numer 3

osiadanie gruntu było jednostajne, a w przypadku punktu 4 nasiliło się ono znacznie od 2022 roku (Rycina 4).

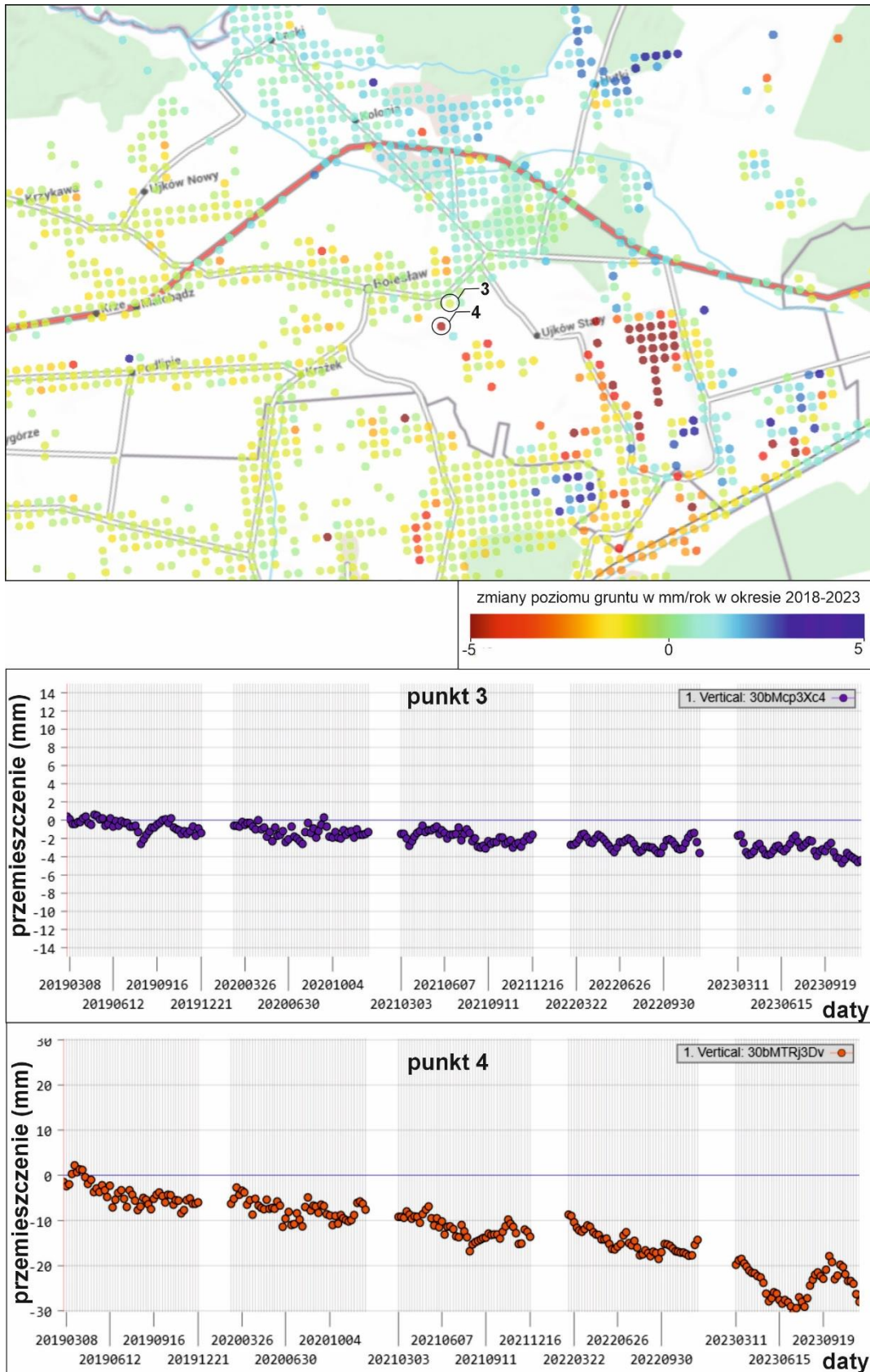




Rycina 2. Punkty w których, zobrazowano zmiany powierzchni gruntu wynikające ze zmian zwierciadła wody podziemnej w granicach 10 mm/rok (A) i 20 mm/rok (B).



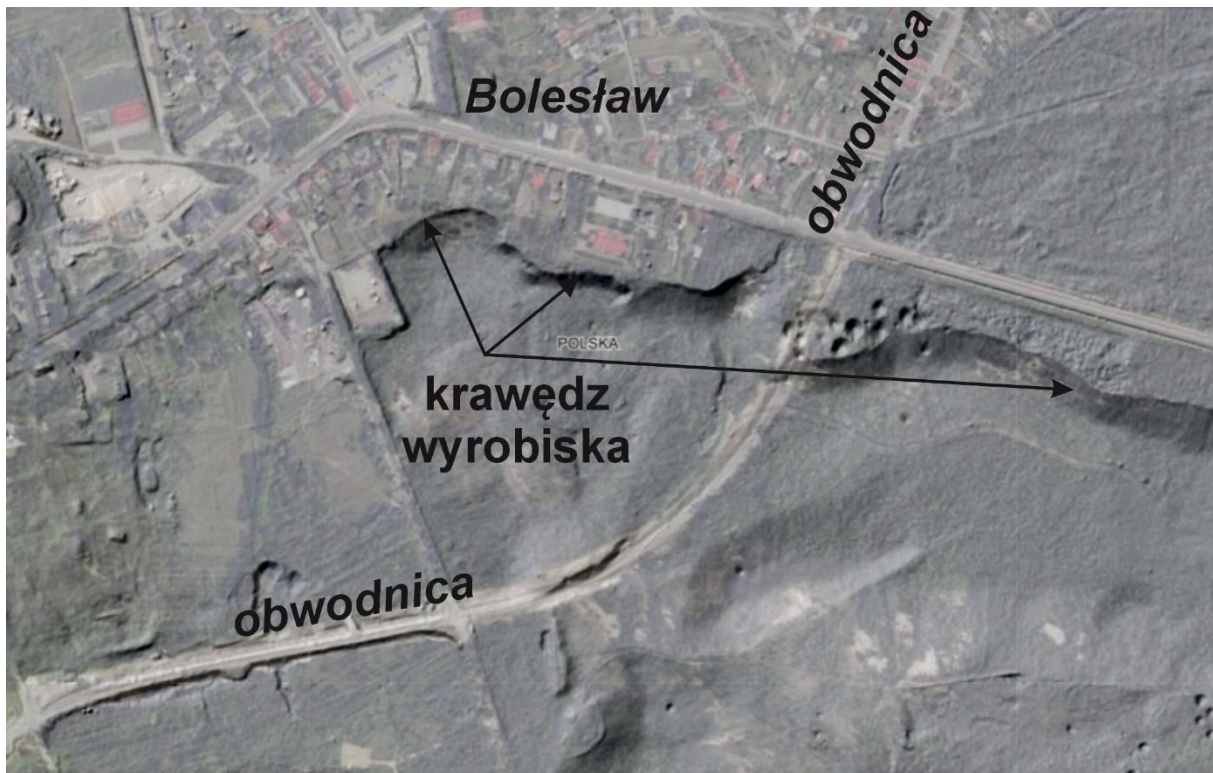
Rycina 3. Punkty w których, zobrazowano zmiany powierzchni gruntu wynikające ze zmian zwierciadła wody podziemnej w granicach 5 mm/rok (mapa u góry ryciny), oraz przebieg zmian powierzchni gruntu w wybranych punktach 1 i 2, w okresie 2019-2023.



Rycina 4. Punkty w których, zobrazowano zmiany powierzchni gruntu wynikające ze zmian zwierciadła wody podziemnej w granicach 5 mm/rok (mapa u góry ryciny), oraz przebieg zmian powierzchni gruntu w wybranych punktach 3 i 4, w okresie 2019-2023.

## LiDAR

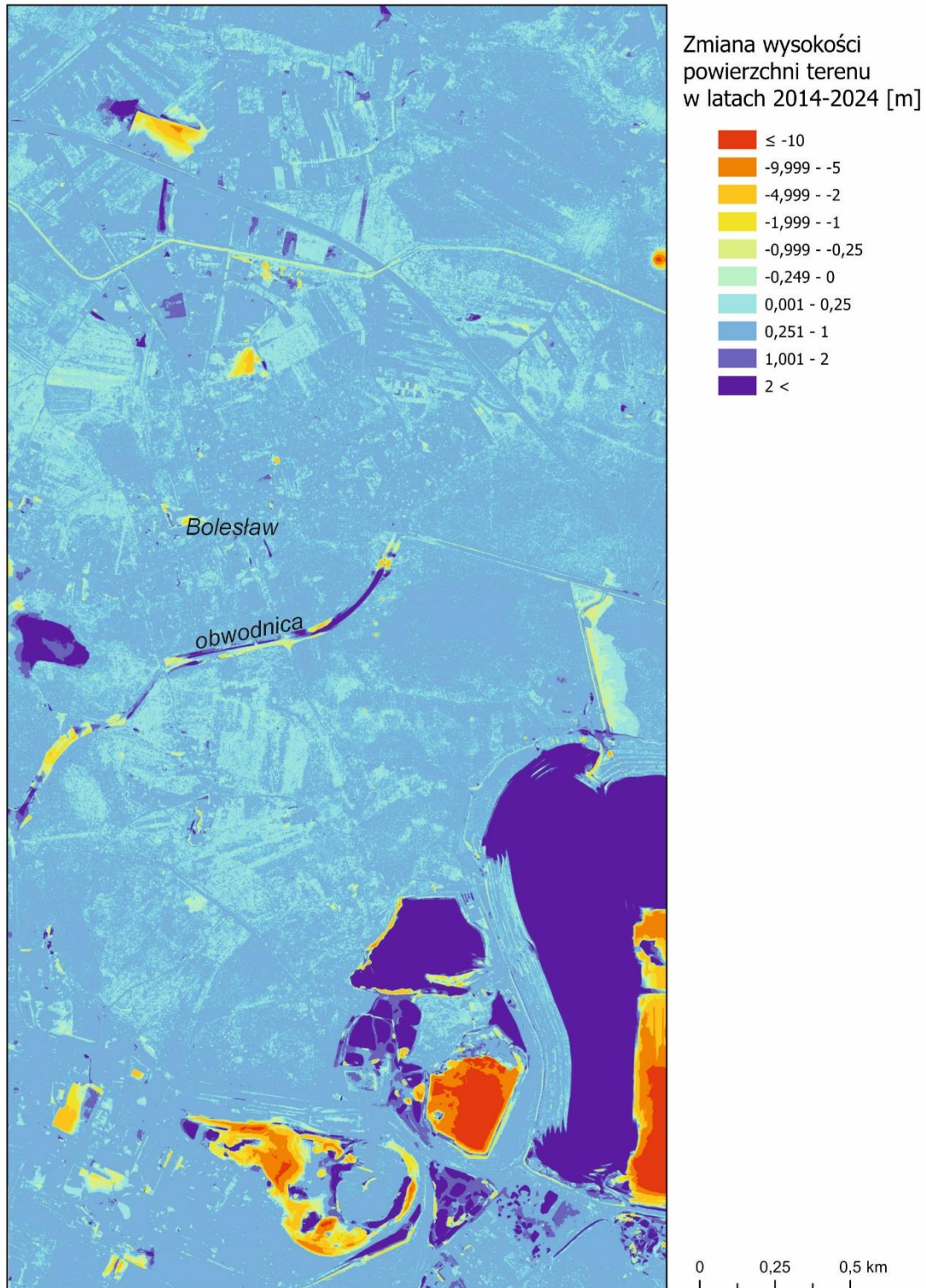
Analiza modeli terenu opracowanych na podstawie danych LiDAR pozwala na analizę powierzchniową rzeźby terenu wraz z uwzględnieniem terenów leśnych i polnych, czyli stref gdzie zwykle nie ma danych z interferometrii radarowej. Analiza modelu terenu dla obszaru, gdzie biegnie obwodnica Bolesławia wykazała, że obwodnica częściowo została wytyczana w strefie dawnego wyrobiska, którego krawędzie biegną na południe od zabudowań miasta Bolesław (Rysunek 5). Wytyczenie obwodnicy w strefie dawnego wyrobiska spowodowało, że strefa ta jest narażona na zalanie przy zachwianiu stosunków wodnych co miało miejsce w wyniku wyłączenia pomp kopalnianych. Zwierciadło wody podniosło się, zalewając najniżej położone obszary, w tym nowo zbudowaną obwodnicę Bolesławia.



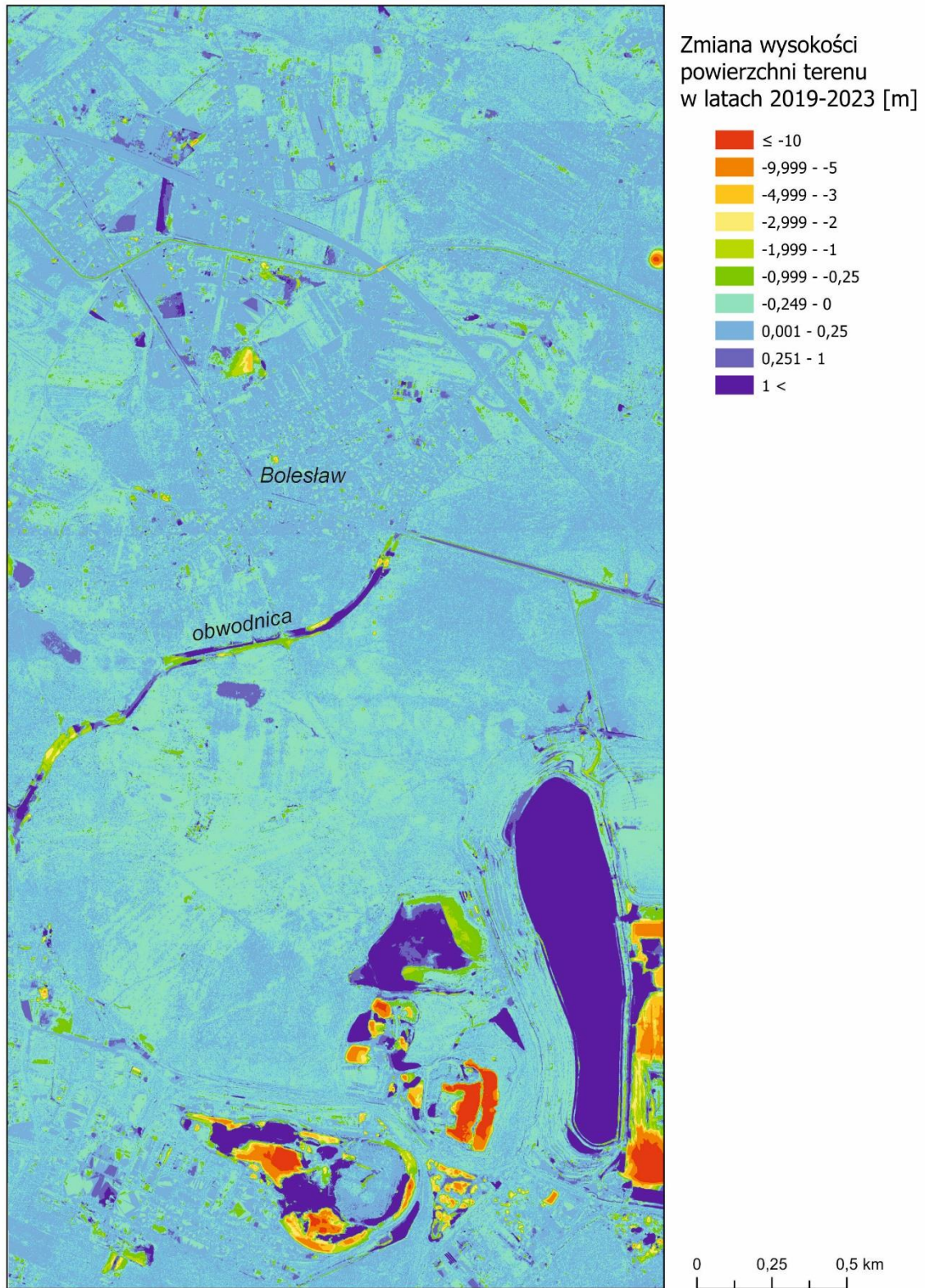
Rycina 5. Model terenu utworzony z danych LiDAR na podkładzie z ortofotomapy z widocznym przebiegiem obwodnicy Bolesławia oraz krawędziami wyrobiska.

Na porównaniu modeli terenu opracowanych na podstawie danych LiDAR z 2014 i 2024 roku, widoczne są bardzo duże zmiany rzeźby terenu na południu analizowanego obszaru, gdzie czynione są zabiegi dotyczące zagospodarowania hałd popłuczkowych. W tej strefie występują obniżenia powierzchni terenu sięgające do ponad 10 m (kolor czerwony) jak i strefy wyniesione o ponad 2 m (kolor ciemnoniebieski); (Rycina 6). Jednak w strefie przebiegu obwodnicy i na

północ od niej, zmiany powierzchni gruntu są niewielkie, podobne do tych jakie zidentyfikowano przy wykorzystaniu interferometrii radarowej. Teren jest tu nieznacznie wyniesiony do około 1 m w ciągu 10 lat. Występują tu jednak lokalne obniżenia gruntu do 10 metrów (Rycina 6). Bardzo podobnie sytuacja wygląda w przypadku mapy różnic wysokości powierzchni terenu w latach 2019-2023 (Rycina 7).



Rycina 6. Zmiany poziomu gruntu występujące w latach 2014-2024 na podstawie modeli terenu LiDAR



Rycina 7. Zmiany poziomu gruntu występujące w latach 2019-2023 na podstawie modeli terenu LiDAR

*4. Wnioski z przeprowadzonych badań w formie opracowania zawierającego szczegółowe analizy wraz z szacunkiem dotyczącym zagrożenia występującego w testowanym terenie (osuwiskowego, powodziowego, związanego z zanieczyszczeniem powietrza zależnie od typu testu badawczego)*

W oparciu o analizę danych z interferometrii radarowej stwierdzono, że w analizowanym terenie niewielkie wynoszenie gruntu wyniosło 10-15 mm/rok w latach 2019-2023, występuje ono w północnej i południowej części badanego obszaru. Zidentyfikowano także wiele punktowych stref w których teren się obniża. Oznacza to, że przy utrzymującej się tendencji wynoszenia gruntu, w ciągu 10 lat terenie się podniesie około 10-15 cm. Obrazy LiDAR ujawniły, że obwodnica Bolesławia przebiega w dawnym obniżeniu poeksploatacyjnym, co determinuje ryzyko zalania tego terenu przy nawet niewielkim naruszeniu stosunków wodnych. Tak się też stało po wyłączeniu pomp wodnych z kopalni Bolesław, kiedy to obwodnica wraz z terenami przyległymi została zalana. Analiza LiDAR wykazała, że w ciągu 10 ostatnich lat, teren objęty analizą generalnie się podnosi, co może być spowodowane odbudowywaniem się zwierciadła wody podziemnej, która wypełnia przestwory w gruncie i powoduje wzrost jego objętości. Wynoszenie terenu jest stosunkowo niewielkie i osiągnęło do 1 m. Analiza modeli terenu z danych LiDAR ujawniła także niewielkie strefy (będące przedmiotem wcześniejszych analiz) obniżające się. Obniżenia te lokalnie osiągają nawet ponad 10 m. Są to zapadliska powstałe w wyniku uwodnienia i zdrenowania piasków po podniesieniu się zwierciadła wody podziemnej. Typowym przykładem takiego obniżenia jest obniżenie zidentyfikowane w punkcie 4, w którym przeprowadzono analizę interferometryczną. Widać jak obniżenie gruntu postępuje od 2022 roku, czyli od momentu wyłączenia pomp w kopalni Bolesław.

Podsumowując, podniesienie zwierciadła wody podziemnej z jednej strony spowodowało wielkoobszarowe, stosunkowo niewielkie wyniesienie terenu, z drugiej strony lokalnie powstały groźne zapadliska. Warto jednak zauważyć, że wynoszenie gruntu pomimo, że jego przyspieszenie widoczne jest po 2022 roku, miało miejsce także wcześniej.