

Raport z testu badawczego dotyczącego zagrożenia powodziowego poprzez modelowanie podnoszenia się zwierciadła wody podziemnej i poziomu gruntu osuwiska położonego w gminie Trzebinia (powiat chrzanowski) z wykorzystaniem 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 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,
- określenie granic, w których zostanie przeprowadzona analiza interferometryczna.

Prace laboratoryjne

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

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

### Założenia teoretyczne

Prace badawcze bazują na modelowaniu wykorzystującym interferometrię radarową, czyli technikę teledetekcyjną służącą do bardzo precyzyjnego pomiaru zmian zachodzących na powierzchni Ziemi. Metoda ta polega na analizie różnic fazowych fal radarowych emitowanych i odbieranych przez satelitę. Satelita wykonuje zobrazenia radarowe tego samego obszaru w różnych momentach czasowych lub z nieznacznie odmiennych orbit. Zestawienie tych obrazów pozwala na utworzenie interferogramu, który obrazuje zmiany fazy sygnału radarowego. Zmiany te są konsekwencją różnic w odległości pomiędzy satelitą a powierzchnią terenu. Takie różnice mogą wynikać z deformacji gruntu, takich jak osiadanie, unoszenie się terenu, ruchy osuwiskowe czy aktywność sejsmiczna. Interferometria radarowa umożliwia detekcję przemieszczeń powierzchni Ziemi z dokładnością sięgającą kilku milimetrów. Jej istotną zaletą jest niezależność od warunków oświetleniowych oraz pogodowych. Technika ta znajduje szerokie zastosowanie w geologii, geodezji oraz w monitorowaniu zagrożeń naturalnych, umożliwiając długookresową obserwację deformacji terenu na rozległych obszarach.

Interferometria radarowa pozwala również na analizę wynoszenia terenu poprzez precyzyjny 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, spowodowanego na przykład wzrostem zwierciadła wody podziemnej w wyniku zaprzestania pompowania wody po działalności górniczej, może stanowić element analizy zagrożenia powodziowego. Satelity radarowe rejestrują wielokrotne zobrazenia tego samego obszaru w kolejnych momentach czasowych, a porównanie faz sygnału radarowego umożliwia identyfikację niewielkich zmian odległości pomiędzy satelitą a powierzchnią terenu. Wzrost poziomu wód podziemnych prowadzi do zwiększenia ciśnienia porowego, co powoduje rozszerzanie się osadów i skał, a w konsekwencji unoszenie powierzchni terenu. Zjawisko to jest rejestrowane przez interferometrię radarową jako systematyczna zmiana fazy sygnału. Analiza długich sekwencji interferogramów pozwala na określenie tempa wynoszenia terenu, które zazwyczaj ma charakter powolny i równomierny, sprzyjający jego wykrywaniu metodami InSAR. Szczególnie efektywne są techniki wieloczasowe, takie jak PS-InSAR oraz SBAS, które umożliwiają ograniczenie wpływu atmosfery oraz szumów sygnału, prowadząc do uzyskania wiarygodnych map przemieszczeń pionowych. Wyniki analiz InSAR mogą być zestawiane z danymi piezometrycznymi dotyczącymi poziomu wód podziemnych. Interferometria radarowa umożliwia jednoczesną analizę procesów zachodzących na dużych obszarach, co ma szczególne znaczenie w regionach o złożonych warunkach hydrogeologicznych. Dane satelitarne stanowią podstawę do modelowania procesów hydrogeologicznych i geomechanicznych, umożliwiając skuteczne monitorowanie wpływu zmian poziomu wód podziemnych na unoszenie się terenu.

Test badawczy obejmuje strefę położoną około 5 km na północny zachód od Trzebini. W wytypowanym obszarze analizowano zmiany powierzchni gruntu. Analizę przeprowadzono dla okresu 2019-2023, dane interferometryczne dotyczące tego okresu są ogólnodostępne. Szczegółowe analizy interferometryczne zostały uwzględnione dla 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 4 punkty położone w różnych strefach obszaru objętego testem badawczym. Dla każdego z 4 punktów przedstawiono grafikę obrazującą zmiany powierzchni gruntu spowodowane zmianami powierzchni zwierciadła wody podziemnej.

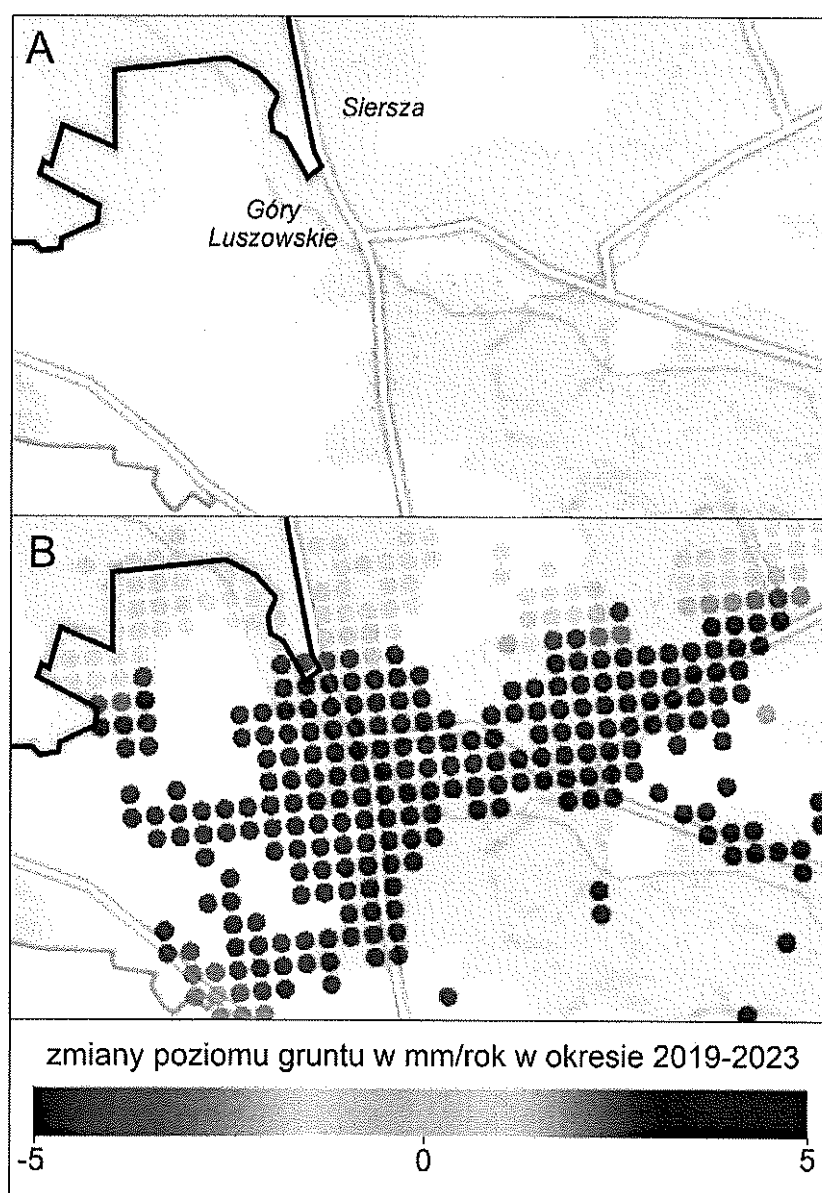
### *3. Wyniki badań w postaci obliczeniowej wraz z niezbędną dokumentacją w postaci tabel, wykresów i rysunków*

Punkty w których analizowano zmiany powierzchni terenu obejmowały obszary zabudowane. W strefach leśnych i łąkowych nie było możliwości zlokalizowania punktów o stałym odbiciu, dlatego na mapie B (Rycina 1) punkty, w których przeprowadzono analizy z wykorzystaniem interferometrii radarowej nie są rozmieszczone równomiernie na całym zobrazowanym obszarze, pomijają one strefy niezabudowane.

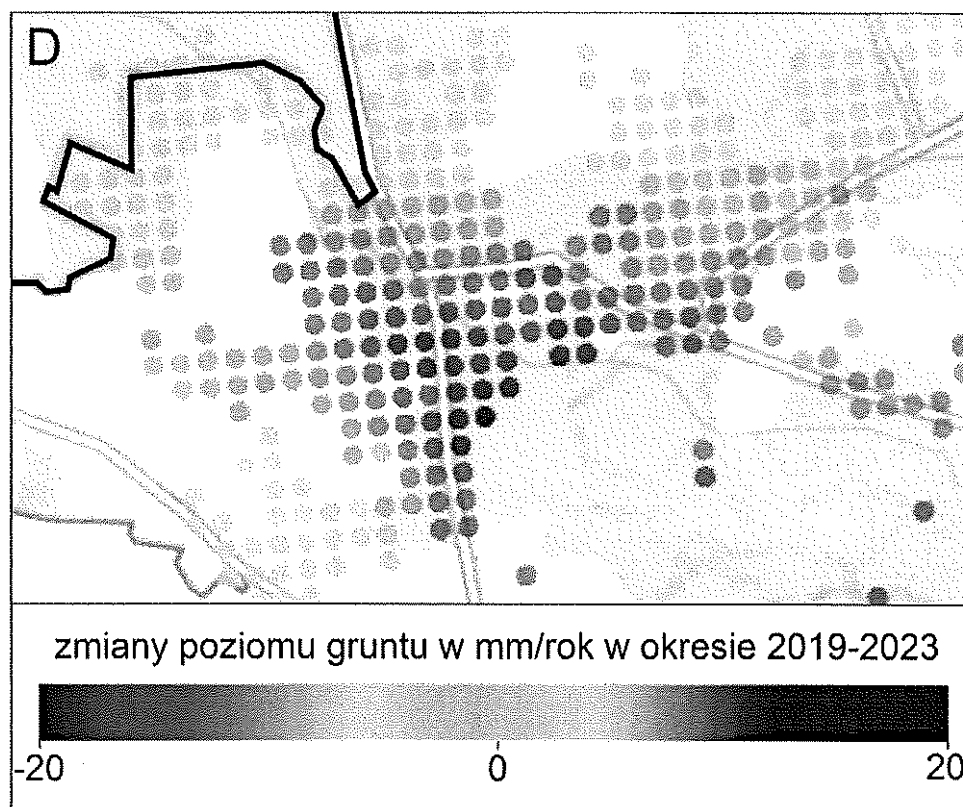
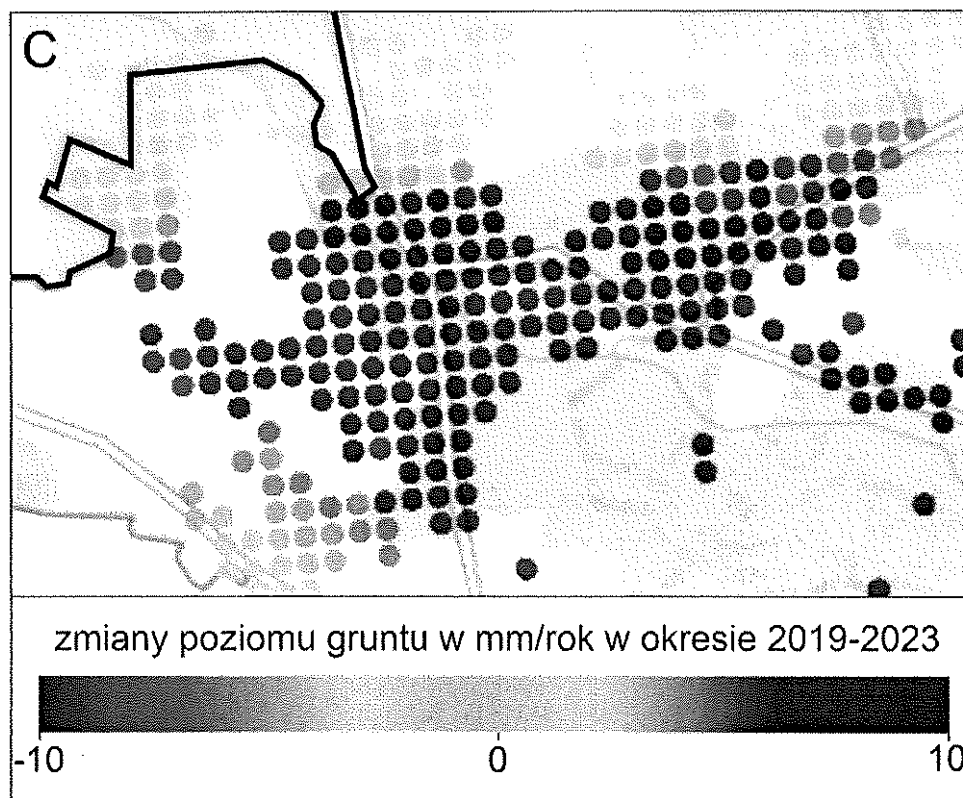
W pierwszym etapie analizy uwzględniono bardzo niewielki próg zmiany powierzchni gruntu wynoszący 5 mm/rok (Rycina 1B). Z przeprowadzonej analizy wynika, że poziom gruntu podnosi się wraz odbudowywaniem się zwierciadła wody podziemnej, co widoczne jest w środkowej i południowej części analizowanego obszaru (ciemnoniebieskie punkty - Rycina 1B). Północna części analizowanego obszaru z kolei obniża się (żółte i zielone punkty). Z analizy danych interferometrycznych na rycinie 1B wynika, że wynoszenie terenu dla większości analizowanego obszaru osiągnęło tempo powyżej 5 mm/rok w okresie 2019-2023, ponieważ większość analizowanych punktów ma ciemnoniebieski kolor oznaczający pełne nasycenie skali barw (w punktach tych wartość wynoszenia gruntu osiągnęła co najmniej 5 mm/rok).

W następnej kolejności analizowano przemieszczenia pionowe gruntu wynoszące 10 mm/rok (Rycina 2C). Większość punktów występujących na mapie, położonych w centralnej części badanego obszaru osiągnęła wartość osiadania 10 mm/rok. Oznacza to, że wynoszenie gruntu na badanym obszarze było większe niż 10 mm/rok w latach 2019-2023. Dopiero analiza zmian powierzchni gruntu do poziomu 20 mm/rok (Rycina 2D) wykazała, że większość punktów nie osiągnęła pełnego nasycenia barwą niebieską, co oznacza, że wartość podnoszenia gruntu na badanym obszarze wynosi pomiędzy 10 a 20 mm/rok. Jedynie w centralnej części mapy zlokalizowanych jest tylko kilka pojedynczych punktów, które wskazują na wynoszenie większe niż 20 mm/rok (pełne nasycenie ciemnoniebieskim kolorem). Analizując kolejną mapę, (Rycina 3) która przedstawia zmiany powierzchni gruntu o 40 mm/rok, zauważamy, że żaden z punktów nie osiąga wartości maksymalnej czyli osiadania wynoszącego 40 mm/rok. Wynika z tego, że najszybsze stwierdzone wynoszenie terenu w badanym obszarze mieści się w przedziale 20-40 mm/rok.

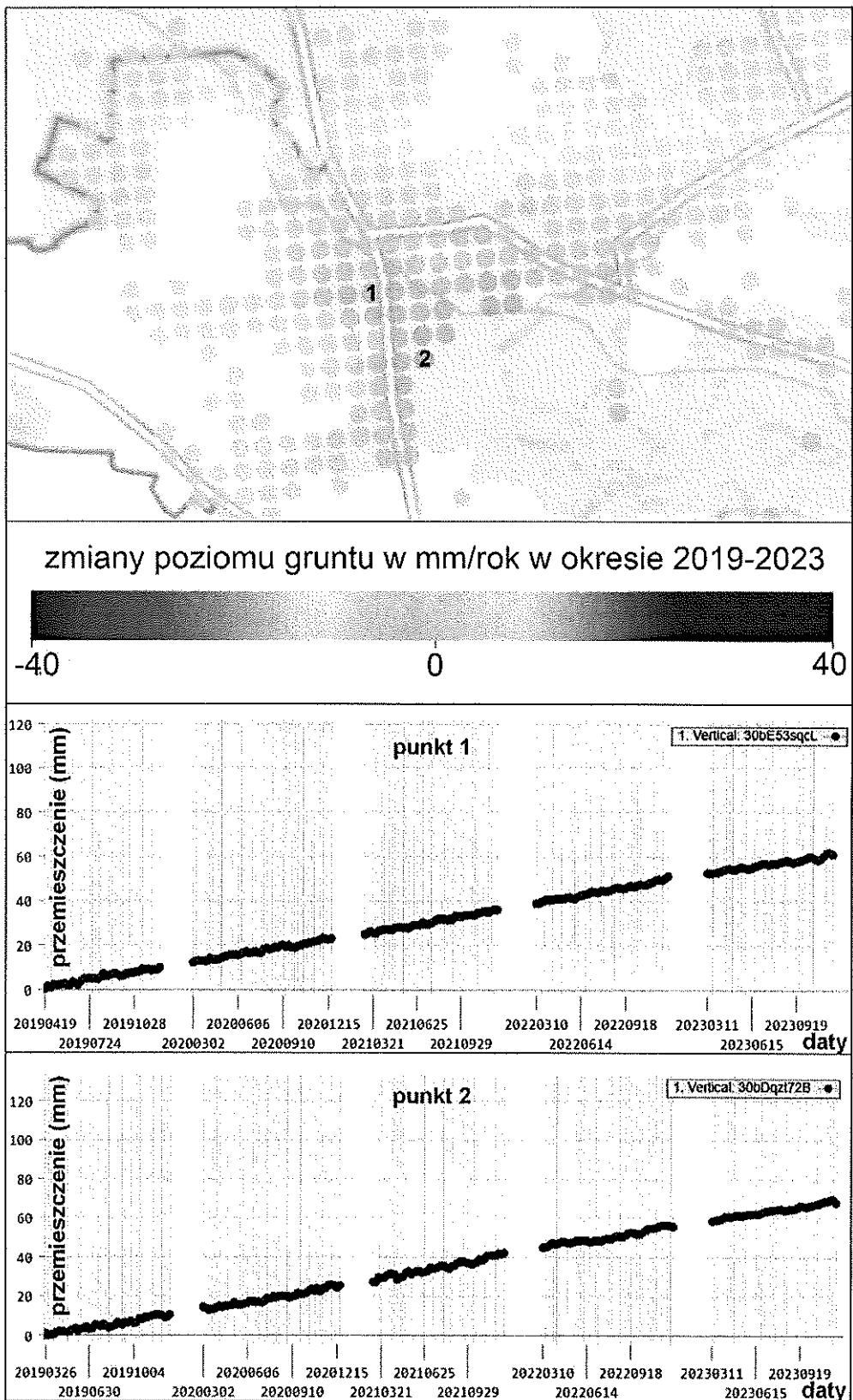
Szczegółowych danych dostarcza analiza zmian wysokości poszczególnych punktów wybranych z analizowanego obszaru (Rycina 3 i 4). Do analizy wybrano dwa punkty gdzie wynoszenie gruntu było najszybsze (punkty 1 i 2). Punkt 1 w ciągu 5 lat (2019-2023), został wyniesiony o 60 mm, z kolei punkt 2 o został wyniesiony o 70 mm. W przypadku obu punktów wynoszenie miało w przybliżeniu jednostajne tempo. Analizowano także punkty położone w peryferyjnych częściach analizowanego obszaru (punkty 3 i 4). Punkt 3 położony w północnej części badanego obszaru, wynoszenie jest tu bardzo nieznaczne i osiąga 8-10 mm w ciągu 5 analizowanych lat. Z kolei punkt 4 położony w północnej części badanego obszaru obniża się nieznacznie. W ciągu analizowanych 5 lat punkt ten obniżył się o około 8 mm. Punkt ten nie jest jedyny, wokół niego położone są punkty także obniżające się nieznacznie. W przypadku punktów 3 i 4 nieznaczne wynoszenie i obniżanie jest jednostajne w czasie.



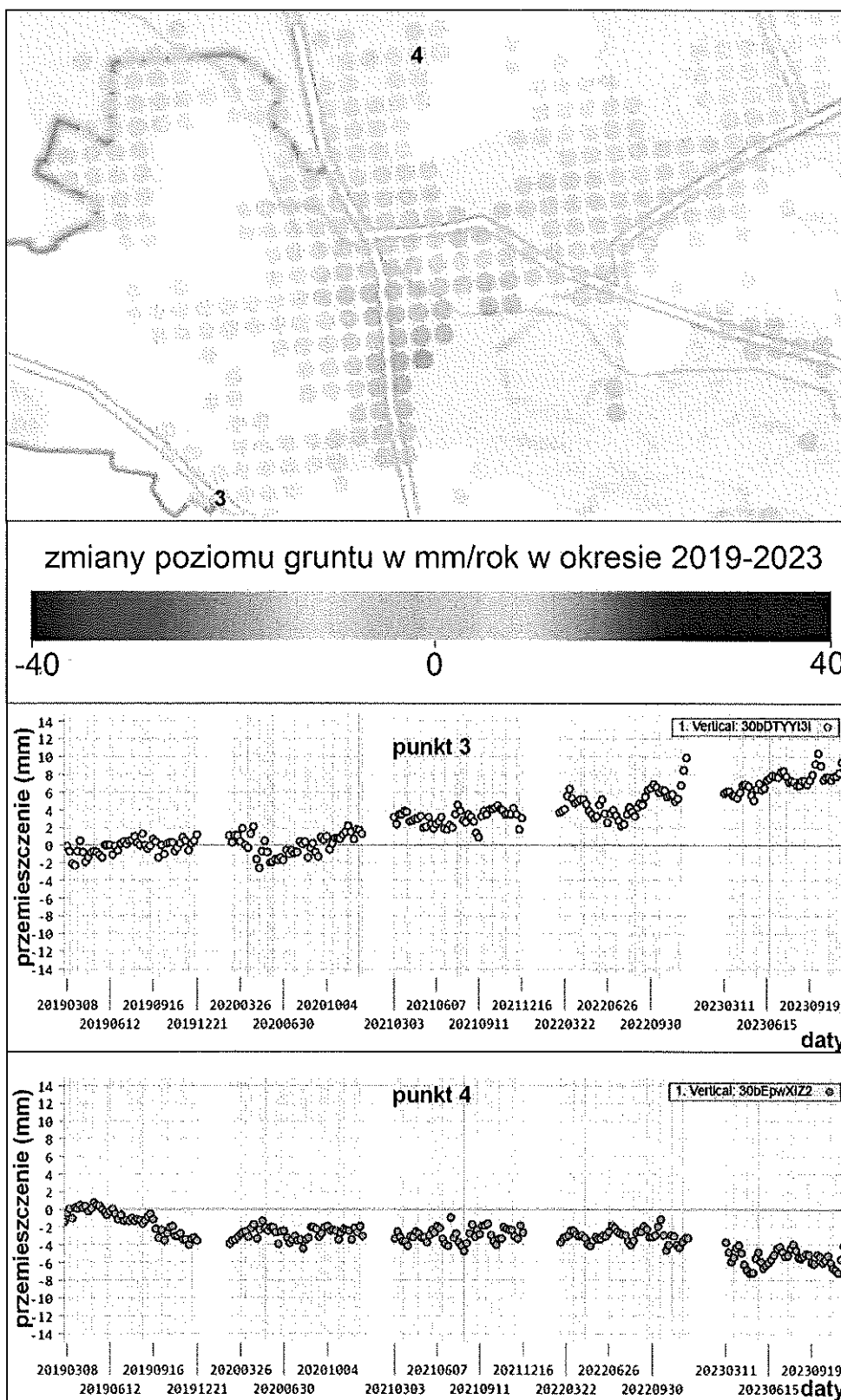
Rycina 1. Położenie badanego obszaru (A) oraz punkty, w których zobrazowano zmiany powierzchni gruntu wynikające ze zmian zwierciadła wody podziemnej w granicach 5 mm/rok (B).



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).



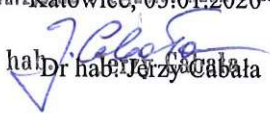
Rycina 3. Punkty w których, zobrazowano zmiany powierzchni gruntu wynikające ze zmian zwierciadła wody podziemnej w granicach 40 mm/rok (mapa u góry ryciny), oraz przebieg zmian powierzchni gruntu w wybranych punktach 1 i 2, w okresie 2019-2023.



Rycina 4. Punkty w których, zobrazowano zmiany powierzchni gruntu wynikające ze zmian zwierciadła wody podziemnej w granicach 40 mm/rok (mapa u góry ryciny), oraz przebieg zmian powierzchni gruntu w wybranych punktach 3 i 4, w okresie 2019-2023.

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 na analizowanym terenie występują rozległe obszary wynoszone w tempie od 20 do 40 mm/rok, przy czym największe wynoszenie, sięgające 70 mm, odnotowano w latach 2019–2023. Wynoszenie gruntu, wraz z podnoszeniem się zwierciadła wody podziemnej, może powodować podtapianie terenów sąsiednich, zazwyczaj położonych w obniżeniach, np. w dolinach rzecznych. W przypadku analizowanego obszaru, gdy teren sąsiadujący z obszarem wynoszonym ulega obniżeniu, może dochodzić do jego stopniowego zalewania. Dodatkowo, gdy poziom wód podziemnych podnosi się na obszarze zbudowanym z piasków, może dochodzić do ich podziemnego wypłukiwania przez wodę oraz do lokalnego powstawania zapadlisk. Takie zapadliska stanowią zagrożenie dla infrastruktury oraz bezpośrednio dla zdrowia ludzi. Modelowanie zmian poziomu gruntu, a co za tym idzie – zwierciadła wody, wskazuje na nasilające się zagrożenie w badanym obszarze. W niektórych miejscach w ciągu roku teren podniósł się średnio o około 30 mm, co oznacza, że przy utrzymaniu się tej tendencji poziom gruntu może wzrosnąć o około 30 cm w ciągu 10 lat, czyli o 3 m w ciągu stulecia. Oczywiście nie wiadomo, jak długo utrzyma się obserwowana w ostatnich latach tendencja wynoszenia gruntu. Podnoszenie się gruntu zachodzi jednocześnie z niewielkim obniżaniem się powierzchni terenu sąsiedniego. Zjawisko to jest niekorzystne i zaburza stosunki wodne, co może prowadzić do zalewania obszarów położonych niżej, gdzie stwierdzono występowanie osiadania terenu.

PREZES ZARZĄDU  
Oddział Górnośląski, Polskie  
Towarzystwo Inżynierów Ziemi  
Katowice, 05.10.2026  
dr hab.   
Dr hab. Jerzy Cabała