

Identyfikacja deformacji nieciągłych na podstawie pomiarów geodezyjnych terenu górniczego

The identification of discontinuous deformations based on geodetic surveys of the mining area



*Tomasz Stoch**)



*Paweł Sopata**)



*Dawid Mrocheń***)



*Artur Wójcik**)

Treść: Skutki podziemnej eksploatacji górniczej mogą ujawniać się na powierzchni terenu w postaci deformacji ciągłych i/lub nieciągłych. Występujące rzadziej deformacje nieciągłe charakteryzują się większą skalą zagrożenia dla obiektów budowlanych oraz infrastruktury powierzchniowej. Występowanie tego typu deformacji praktycznie dyskwalifikuje teren z możliwości zabudowy. Natomiast dla istniejących obiektów może prowadzić do uszkodzeń i zniszczeń uniemożliwiających bezpieczne użytkowanie tych obiektów. W artykule przedstawiono wyniki obserwacji liniowej deformacji nieciągłej, która ujawniła się na powierzchni w postaci progów terenowych oraz garbu o długości kilkuset metrów. W badaniach wykorzystano satelitarne i klasyczne metody pomiarowe. Technika GNSS w trybie RTK umożliwiła pomiar współrzędnych przestrzennych kilku tysięcy punktów na powierzchni terenu w regularnej siatce. Równolegle prowadzono precyzyjne pomiary wysokościowe (niwelacja geometryczna) wykonywane na trwale stabilizowanych punktach linii obserwacyjnej. Profil wzdłuż linii obserwacyjnej przecinał prostopadle próg terenowy. Pomiary zrealizowano w kilku seriach przez ponad półtora roku nad czynną eksploatacją górniczą. Objęto nimi obszar o powierzchni ponad 50 ha. Opracowanie i analiza wyników pomiarów umożliwiły wygenerowanie przestrzennego pola deformacji. Dodatkowo rozwój deformacji w czasie przedstawiono na pionowych profilach terenu wzdłuż linii pomiarowej. Przyczyny wystąpienia deformacji nieciągłej wywołanej eksploatacją górniczą powinny wyjaśnić wyniki badań struktury gruntu oparte o wdrożone metody geofizyczne.

*) AGH w Krakowie

**) Instytut Mechaniki Górotworu PAN

Abstract: The effects of underground mining exploitation may manifest themselves on the ground surface in the form of continuous and/or discontinuous deformations. The less frequent discontinuous deformations are characterised by a greater scale of danger to buildings and surface infrastructure. The presence of this type of deformation practically disqualifies the area from development. For existing facilities, on the other hand, it may lead to damage and destruction preventing the safe use of these facilities. The paper presents a study of linear discontinuous deformation that revealed itself on the surface in the form of a terrain sill and a hump several hundred meters long. Satellite and classical measurement methods were used in the study. GNSS technology in RTK mode made it possible to measure the spatial coordinates of several thousand points on the ground surface in a regular network. In parallel, precise height measurements (geometric level) based on permanently stabilised observation line points were carried out. The profile along the observation line crossed the terrain sill perpendicularly. The measurements were carried out in several series over a period of more than a year and a half over an active mining exploitation. An area of over 50 ha was covered. The processing and analysis of the measurement results made it possible to generate a spatial deformation field. In addition, the development of deformation over time is shown on vertical profiles of the terrain along the survey line. The reasons for the occurrence of discontinuous deformation caused by mining exploitation should be explained by the results of soil structure research based on implemented geophysical methods.

Słowa kluczowe:

deformacja nieciągła, pomiary deformacji, ochrona terenów górniczych

Keywords:

discontinuous deformation, deformation measurements, mine area protection

1. Wprowadzenie

Zmiany powierzchni terenu występujące w wyniku podziemnej eksploatacji górniczej to skutek niekorzystnego zjawiska procesu deformacji. Przebieg tego procesu uzależniony jest od wielu czynników (Kowalski 2020, Popiołek 2009). Zalicza się do nich zarówno czynniki górnicze, związane ze sposobem prowadzenia robót w złożu, jak i czynniki geologiczne, związane z budową ośrodka skalnego. Stopień rozpoznania czynników geologicznych, a następnie odpowiedni dobór parametrów górniczych prowadzonej eksploatacji w dużym stopniu determinuje charakter procesu deformacji (Kowalski 2020, Ferentinou i in. 2020, Strzałkowski i in. 2006). Wówczas w pewnym, dość szerokim zakresie można przewidzieć zagrożenie, również w aspekcie ilościowym (Malinowska i in. 2018). Ograniczona jednak wiedza, dotycząca szczegółowej budowy i struktury górotworu wpływa na dokładność prognoz. Nieuwzględnione w modelu, w większości przypadków lokalne zaburzenia budowy górotworu mogą powodować anomalie w spodziewanym obrazie zmian powierzchni terenu (Sopata 2020). Ma to szczególne znaczenie w obszarach zurbanizowanych, gdzie większe odstępstwa od spodziewanego przebiegu procesu deformacji są przyczyną dodatkowych zagrożeń (np. z tytułu wystąpienia deformacji nieciągłych) dla obiektów i infrastruktury technicznej (Kowalski 2020, Kruczkowski 2017). Tego typu przykład przedstawiono w artykule. W obszarze przewidywanych deformacji ciągłych, wynikających z eksploatacji złoża węgla kamiennego, wystąpiła liniowa deformacja nieciągła. Jej rozmiar i charakter spowodował istotny wzrost zagrożenia terenu górniczego.

Artykuł stanowi uzupełnienie do szczegółowo omawianej w poprzednich latach strefy nieciągłości (Niedojadło 2016), w następstwie której zniszczeniu uległ budynek mieszkalny jednorodzinny, nawierzchnia drogi asfaltowej oraz wystąpiły trwałe uszkodzenia ogrodzeń.

2. Rejon badań

Obszar badań zlokalizowany był na terenie górniczym czynnej kopalni węgla kamiennego, w północno-wschodniej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW). Badania deformacji prowadzone były w tym rejonie od 2009 roku

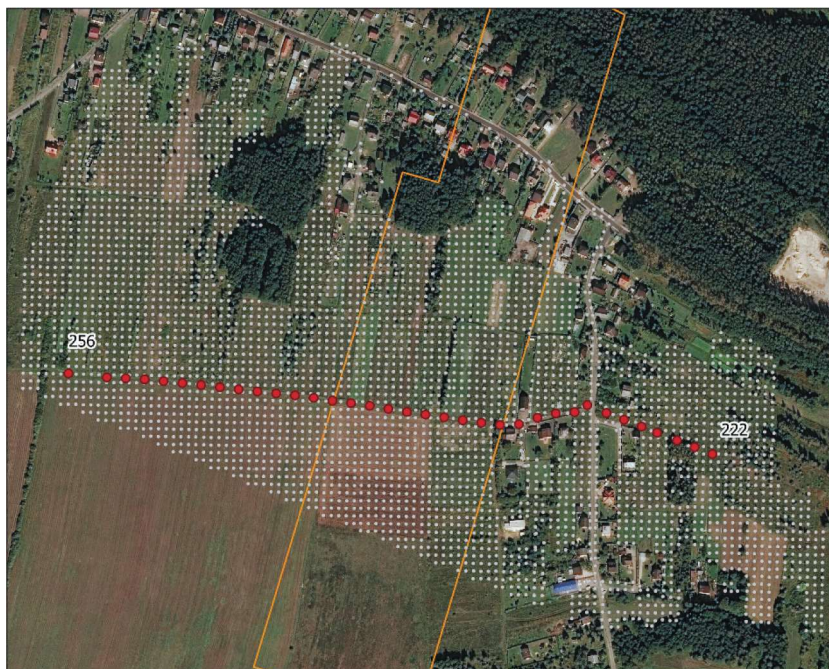
(Stoch 2019). W analizowanym okresie, tj. od lipca 2019 roku do czerwca 2020 roku, na powierzchni terenu ujawniały się deformacje wywołane eksploatacją ściany górniczej eksploatowanej w analizowanym rejonie w trzecim pokładzie. Lokalizację ściany wywołującej deformacje powierzchni terenu w okresie badań obrazuje rysunek 1 (rozdz.3). Eksploatację ściany rozpoczęto w lipcu 2019 roku i do końca sierpnia 2020 roku osiągnęła wybieg 860 m.

Pod względem litologii i stratygrafii w budowie geologicznej do głębokości rozpoznania, tj. do około 1200 m biorą udział utwory czwartorzędu, paleogenu, neogenu, triasu oraz karbonu produktywnego. Utwory nadkładu budują wspólnie lub samodzielnie utwory czwartorzędu, paleogenu, neogenu oraz triasu. Główną przyczyną litologiczną występowania deformacji nieciągłych w rejonie badań jest występowanie grubych i sztywnych ławic piaskowców (Drzewiecki, Myszkowski 2018) oraz utworów plastycznych w przypowierzchniowej warstwie gruntu (Niedojadło 2016). W utworach karbonu (pomiędzy warstwami z węglem kamiennym) warstwy sztywnych piaskowców osiągają grubość do około 35 m. W stropie zasadniczym (ponad pokładami węgla) miąższość tych warstw – w postaci piaskowców średnio i gruboziarnistych – osiąga lokalnie ponad 85 m grubości.

3. Metodyka badań

W celu obserwacji zmian morfologii całej powierzchni terenu w rejonie badań wdrożono pomiary o charakterze quasi-powierzchniowym. Dane o przestrzennym położeniu (X, Y, Z) punktów terenowych pozyskiwano w regularnej siatce niestabilizowanych punktów pomiarowych o rozdzielczości projektowej 10 m x 10 m. Objęto nią większość obszaru spodziewanych deformacji. Pokrycie terenu siatką punktów obserwowanych w rejonie badań na tle konturu wyeksploatowanej ściany górniczej przedstawiono na rysunku 1.

Zaprojektowana siatka punktów (o wyznaczonych współrzędnych płaskich X, Y) umożliwiła każdorazowo wykonywanie okresowych pomiarów w miejscach (punktach) o zbliżonej lokalizacji w każdej serii obserwacyjnej. Dokładność identyfikacji (tyczenia) tożsamy punktów określał promień nie większy niż 0,5 m. Spełnienie tego warunku umożliwiało przyjęta technika pomiarowa w postaci obserwacji satelitarnych wykonywanych w czasie rzeczywistym



Rys. 1. Siatka punktów obserwowanych w rejonie badań
Fig. 1. Grid of points observed in the research area

stym – GNSS RTK. Ruchome odbiorniki (GS16 firmy Leica) wyznaczały współrzędne przestrzenne punktów siatki w oparciu o własną bazę, której współrzędne wyznaczane były w post-processingu na podstawie wyników wielogodzinnych obserwacji satelitarnych w nawiązaniu do stacji permanentnych ogólnopolskiej sieci ASG-EUPOS.

W efekcie realizacji danej serii pomiarowej otrzymywano kilka tysięcy punktów terenowych o określonych współrzędnych przestrzennych (X, Y, Z). Niejednakowa liczba punktów w różnych seriach wynikała z ograniczonych możliwości dostępu do niektórych punktów siatki, przykładowo zlokalizowanych w granicach upraw rolnych (w okresie wegetacji roślin). Wyniki tych pomiarów umożliwiły każdorazowo tworzenie modelu powierzchni terenu. Dokładność wysokościowa modelu zdeterminowana była precyzją wykorzystanej techniki pomiarowej oraz przyjętą metodyką prowadzenia obserwacji (głównie stopniem identyfikacji tożsamyh punktów w terenie w kolejnych seriach pomiarowych). Szacunkowo wyniosła ona około ± 10 cm.

W rejonie badań prowadzono również obserwacje wysokościowe metodą niwelacji precyzyjnej. Do pomiarów wykorzystano niwelator DiNi012 firmy Zeiss. Obserwacje wykonywano w punktach tworzących linię profilową. Linię obserwacyjną o długości około 870 m tworzyło 35 punktów. Wszystkie punkty linii zastabilizowano w sposób trwały w gruncie przy użyciu żebrowanych prętów zbrojeniowych o długości 1,2 m. Odległości pomiędzy punktami wynosiły około 25 m. Lokalizację punktów linii obserwacyjnej, usytuowanej w przybliżeniu w kierunku prostopadłym do krawędzi pola górniczego, przedstawiono na rysunku 1. Skrajne punkty linii (w kierunku zachodnim) znajdowały się poza przewidywanym zasięgiem oddziaływania robót górniczych na powierzchnię.

Pomiary linii profilowej prowadzono w zamkniętym ciągu niwelacyjnym. Dаты wykonywania serii pomiarowych synchronizowano z terminami obserwacji satelitarnych regularnej sieci punktów. Nawiązanie wysokościowe stanowił każdorazowo końcowy punkt linii obserwacyjnej (punkt 256), którego wysokość przyjęto za stałą, niezmienną wskutek

oddalonej o 350 m krawędzi eksploatacji górniczej. Przyjęta metodyka pomiarów umożliwiła wyrównywanie obserwacji w jednolitym układzie wysokościowym. Wykonane pomiary charakteryzowały się dokładnością w zakresie niwelacji precyzyjnej. Dokładność ta wynikała z klasy wykorzystanego do pomiarów instrumentu i zawierała się w przedziale $\pm 1,2$ mm/km ciągu niwelacyjnego. Wyniki pomiarów niwelacyjnych umożliwiały okresowe wyznaczenie profili terenowych wzdłuż przebiegu linii.

4. Rezultaty

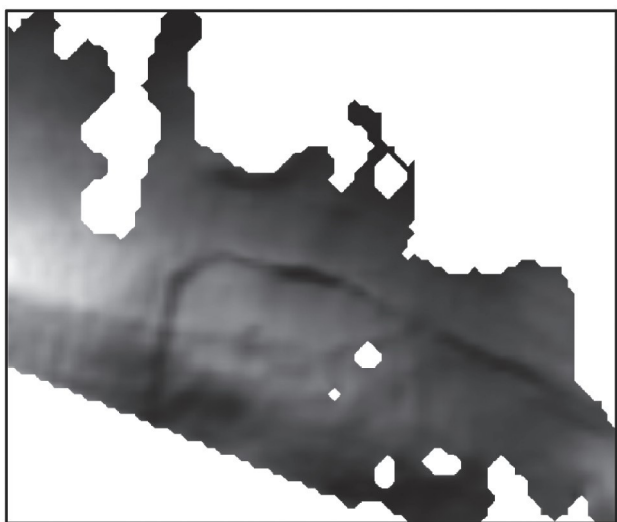
W okresie od lipca 2019 roku do czerwca 2020 roku wykonano łącznie cztery serie obserwacji GNSS RTK zaprojektowanej sieci punktów. Ze względu na jej obszerność i ilość punktów (pierwotny projekt obejmował blisko 4 tys. punktów) obserwacje w każdej serii prowadzono w przeciągu dwóch dni. Pomiary rozpoczęto 29-30.07.2019 roku, przed rozruchem eksploatacji górniczej wywołującej deformacje powierzchni terenu w rejonie badań. Kolejne serie pomiarowe wykonywano w dniach:

- 18-19.11.2019 r.,
- 19-20.02.2020 r.,
- 9-10.06.2020 r.

Na podstawie wyników przeprowadzonych pomiarów (w każdej serii) generowano numeryczny model terenu (NMT). Przykładowy wynik modelowania powierzchni terenu rejonu badań, z widoczną liniową deformacją nieciągłą, przedstawiono na rysunku 2 (wykonanym na podstawie wyników pomiarów z lutego 2020 roku).

W oparciu o punkty linii pomiarowej, od lipca 2019 roku do czerwca 2020 roku, prowadzono obserwacje wysokościowe metodą niwelacji geometrycznej (niwelacja precyzyjna). W analizowanym okresie wykonano pięć serii obserwacyjnych, w tym cztery zsynchronizowane z terminami wykonywania obserwacji GNSS-RTK. Zrealizowano je w dniach:

- 25.07.2019 r. (w terminie serii GNSS-RTK),
- 08.10.2019 r.,



Rys. 2. Model powierzchni terenu rejonu badań w lutym 2020 roku

Fig. 2. Model of the terrain surface of the research area in February 2020

- 20.11.2019 r. (w terminie serii GNSS-RTK),
- 18.02.2020 r. (w terminie serii GNSS-RTK),
- 09.06.2020 r. (w terminie serii GNSS-RTK).

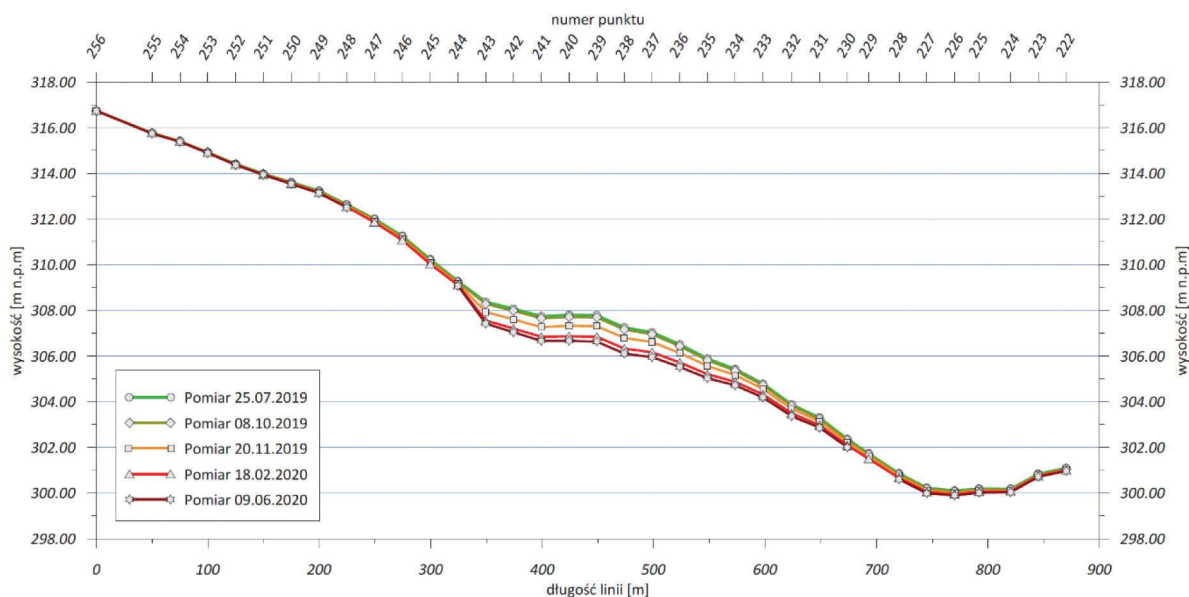
W rezultacie przeprowadzonych pomiarów wysokościowych otrzymano szereg pięciu profili terenowych wzdłuż przebiegu linii. Przedstawione na rysunku 3 profile uwidaczniają zmiany wysokościowe powierzchni terenu wskutek prowadzonych pod ziemią robót górniczych. Dane wysokościowe na profilach mają charakter dyskretny (punktowy), zgodnie z lokalizacją punktów obserwowanych. Dokładność wyznaczonych wysokości punktów nie przekracza zakresu ± 1 mm.

5. Analiza wyników

Przedstawione w poprzednim rozdziale wyniki wskazują jednoznacznie na wystąpienie w rejonie badań deformacji nieciągłych. Zidentyfikowane liniowe deformacje nieciągłe

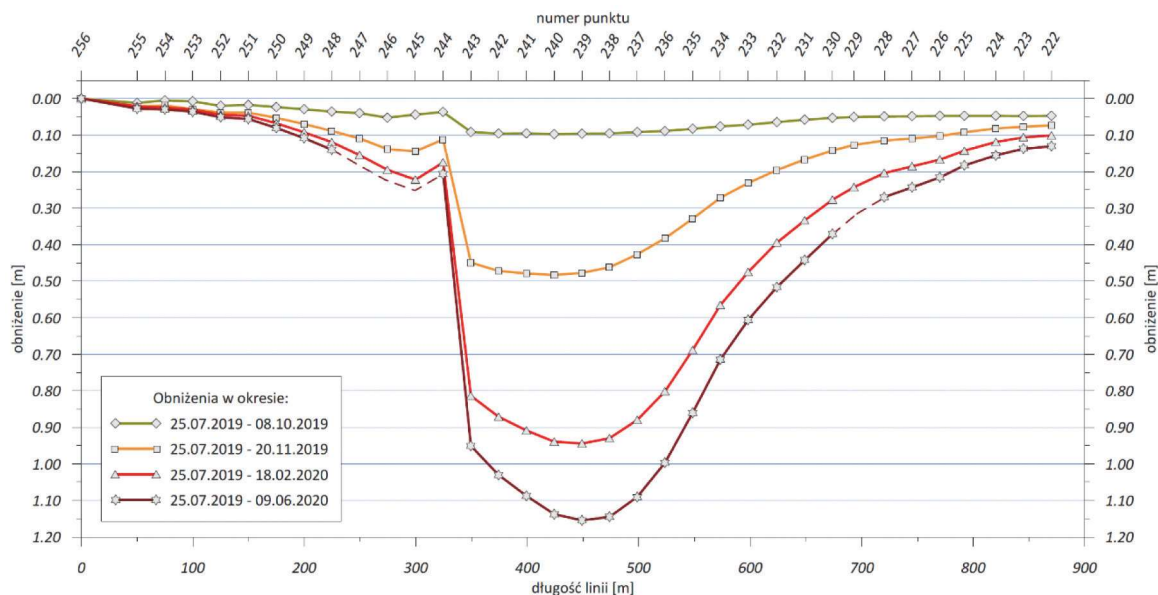
o charakterze garbu i progu (stopnia) terenowego posiadają wzajemnie prostopadłą rozciągłość. Garb terenowy przebiega w kierunku wschód – zachód, natomiast stwierdzony próg terenowy w kierunku północ – południe (rys. 2). Zrealizowane serie pomiarów geodezyjnych na punktach regularnej siatki i na punktach linii obserwacyjnej, umożliwiły przeprowadzenie analiz zarówno ilościowych jak i czasowych, powstałych w terenie deformacji. Analiza dynamiki rozwoju tych deformacji wskazuje na aktywację deformacji nieciągłych w okresie pomiędzy październikiem a listopadem 2019 roku. Przedstawiają to profile terenowe wzdłuż linii obserwacyjnej w okresie od lipca do listopada 2019 roku. W profilach z lipca i października na powierzchni terenu ujawniają się niewielkie obniżenia w zakresie deformacji ciągłych. Nie przekraczają one wartości $w = 0,1$ m. Dopiero w profilu z listopada pomiędzy punktami 243 i 244 ujawnia się wystąpienie progu (stopnia) terenowego o zrzucie przekraczającym nieco $h = 0,3$ m. Krótki okres aktywacji wskazywał wówczas na dużą dynamikę zmian morfologii powierzchni terenu. Kolejna seria pomiarów, wykonana w lutym 2020 roku, uwidacznia fazę dalszego rozwoju deformacji nieciągłych. Próg terenowy osiągnął wówczas zrzut dochodzący do blisko $h = 0,6$ m. Prawie dwukrotne zwiększenie jego wysokości wystąpiło w co najmniej trzykrotnie dłuższym okresie czasu. Wskazuje to na znacznie mniejszą (malejącą w czasie) dynamikę rozwoju deformacji nieciągłych. W okresie ostatnich czterech miesięcy obserwacji (02.2020 r. – 06.2020 r.) dynamika rozwoju analizowanych deformacji wskazywała na fazę końcową procesu deformacji. Wysokość progu terenowego w tym czasie wzrosła jedynie o około 0,1 m. Tym samym całkowita stwierdzona wysokość progu terenowego w rocznym okresie obserwacji wyniosła około $h = 0,7$ m. Powyższe wnioski potwierdzają wygenerowane na podstawie profili terenowych wykresy obniżenia powierzchni terenu wzdłuż przebiegu linii obserwacyjnej. Przedstawiono je na rysunku 4.

Na podstawie zaprezentowanych wykresów obniżenia można wnioskować o prawdopodobnych przyczynach wystąpienia progu terenowego. Uwidoczniony efekt „obciążenia” wpływów na zachodnim skrzydle niecki obniżeniowej wskazuje na możliwość wystąpienia efektu skumulowanej krawędzi ścian górniczych eksploatowanych na różnej głębokości (próg terenowy wystąpił nad krawędzią analizowanej ściany), co



Rys. 3. Profile powierzchni terenu wzdłuż linii obserwacyjnej

Fig. 3. Terrain surface profiles along the observation line



Rys. 4. Obniżenia powierzchni terenu wzdłuż linii obserwacyjnej
Fig. 4. Subsidence of the terrain surface along the observation line

potwierdziła analiza materiałów kartograficznych. Efekt ten nie występuje na wschodnim skrzydle niecki, gdzie wystąpiły deformacje powierzchni terenu o charakterze ciągłym. W tym kierunku następował rozwój pola eksploatacji, w związku z czym krawędzie kolejnych ścian nie kumulowały się na granicy pola.

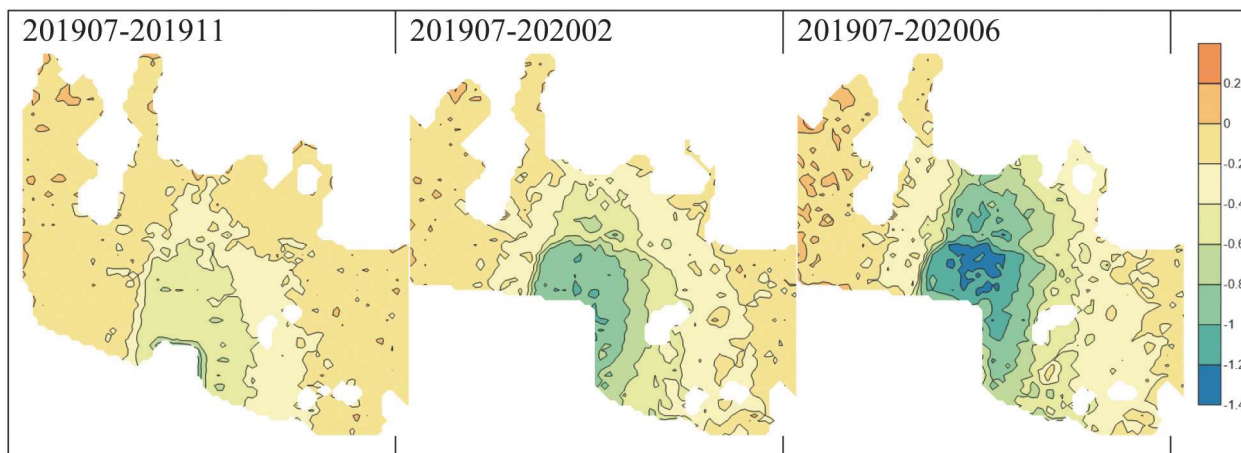
W przypadku garbu terenowego, który uwidacznia się wyraźnie na numerycznym modelu terenu (rys. 2), przyczyn jego wystąpienia poszukiwać można w oparciu o wyniki zrealizowanych kilka lat temu badań geofizycznych (Niedojadło 2016). Wykonane wówczas badania elektrooporowe przypowierzchniowej warstwy górotworu wskazały na występowanie plastycznych utworów ilastych ułożonych w otoczeniu zwięzłych skał wapiennych. Utwory plastyczne, ściskane w procesie deformacji powierzchni terenu i górotworu zostały wypchnięte ku górze, tworząc garb, którego szerokość wyniosła około 26 m.

Wystąpienie deformacji nieciągłych uwidaczniają także powierzchniowe rozkłady obniżeń wygenerowane na podstawie informacji zawartych w poszczególnych NMT. Przedstawiono je na rysunku 5.

Na przedstawionych rozkładach obniżeń wyraźnie widać rozwój i lokalizację deformacji nieciągłych, zarówno progu (kumulacja izol linii obniżeń po zachodniej stronie niecki obniżeniowej), jak i garbu terenowego (ograniczenie zasięgu obniżeń w centralnej części obszaru badań w lutym 2020 r. i czerwcu 2020 r.). Oprócz lokalizacji i rozciągłości, obrazy te zawierają istotne informacje ilościowe. Potwierdzają one wyznaczoną z pomiarów niwelacyjnych wysokość progu terenowego w zakresie do $h = 0,8$ m oraz wskazują na wysokość garbu terenowego przekraczającą $h = 0,5$ m.

6. Podsumowanie

Wykonywane w terenie pomiary geodezyjne, zarówno w regularnych siatkach punktów (powierzchniowo), jak i na liniach obserwacyjnych (profilowo), umożliwiają identyfikację i opis deformacji nieciągłych. Na ich podstawie stwierdzać można lokalizację i przebieg tych deformacji. Wyniki pomiarów geodezyjnych pozwalają wyznaczyć parametry (wymiały) deformacji nieciągłych. W przypadku deformacji



Rys. 5. Obniżenia powierzchni terenu w rejonie badań
Fig. 5. Subsidence of the terrain surface in the research area

liniowych będą to: kierunek rozciągłości, wysokość zrzutu czy szerokość. Ma to znaczenie np. w obszarach pokrytych roślinnością, gdzie w wielu przypadkach makroskopowo trudno jest stwierdzić występowanie tego typu zjawisk. Podobny problem występować może w rejonach zurbanizowanych, we wczesnej fazie rozwoju deformacji nieciągłych. Wówczas, przy odpowiednim przetwarzaniu wyników pomiarów, analizy ilościowe wspomagać mogą identyfikację początkowego etapu aktywacji niebezpiecznego zjawiska. W aspekcie zapewnienia powszechnego bezpieczeństwa odpowiedni czas reakcji na występujące deformacje nieciągłe może mieć kluczowe znaczenie dla skutecznej ochrony obiektów i prawidłowego ich funkcjonowania.

Literatura

- DRZEWIECKI J., MYSZKOWSKI J. 2018 - Mining-induced seismicity of a seam located in rock mass made of thick sandstone layers with very low strength and deformation parameters. *Journal of Sustainable Mining*. 17, 167-174.
- KOWALSKI A. 2020 - Deformacje powierzchni na terenach górniczych kopalń węgla kamiennego. Wydawnictwo GiG. Katowice.
- KRUCZKOWSKI, M. 2017 - Określenie przyczyn powstania liniowych deformacji nieciągłych w wybranej kopalni w zachodniej części GZW, *Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji*, Vol. 6, iss. 3, 111-120.
- MALINOWSKA A., MISAR R., TAJDUŚ K. 2018 - Geomechanical modeling of subsidence related strains causing earth fissures. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*. 15, 2, 197-204.
- FERENTINOU M., WITKOWSKI W., HEJMANOWSKI R., GROBLER H., MALINOWSKA A. 2020 - Detection of sinkhole occurrence, experiences from South Africa. *Proceedings IAHS*, 382, 77-82.
- NIEDOJADŁO Z. i in. 2016 - Wpływ lokalnej, przypowierzchniowej budowy geologicznej na deformacje powierzchni terenu w warunkach podziemnej eksploatacji górniczej. „Przegląd Górniczy”. 72, 1, 18-26.
- POPIOLEK E. 2009 - Ochrona Terenów Górniczych. Wydawnictwa AGH. Kraków.
- SOPATA P. 2020 - Horizontal strains over the length of single section of observation line – problem analysis. *Geoinformatica Polonica*. 19, 31-35.
- STOCH T. 2019 - Przemieszczenia poziome w ochronie terenów górniczych. Wydawnictwa AGH, Rozprawy, Monografie Nr 367. Kraków.
- STRZAŁKOWSKI P., PIWOWARCZYK J., ŁAPAJSKI K. 2006 - Występowanie deformacji nieciągłych liniowych w świetle analiz warunków geologiczno-górniczych. „Przegląd Górniczy”, 62, 5, 1-5.

Artykuł wpłynął do redakcji w styczniu 2022
Akceptowano do druku 10.03.2022

Informacja o Autorach

Tomasz Stoch, dr hab. inż., prof. AGH, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska; Katedra Ochrony Terenów Górniczych, Geoinformatyki i Geodezji Górniczej, prowadzi badania nad wykorzystaniem przemieszczeń ośrodka gruntowego wywołanymi działalnością górniczą w ocenie zagrożenia obiektów budowlanych. tomst@agh.edu.pl

Paweł Sopata dr inż., AGH, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska; Katedra Ochrony Terenów Górniczych, Geoinformatyki i Geodezji Górniczej, adiunkt - prowadzi badania nad rozkładem odkształceń poziomych w strefach deformacji powierzchni terenu i górotworu, wykorzystując geodezyjne i teledetekcyjne (głównie InSAR) metody pomiarów. Pawel.Sopata@agh.edu.pl

Dawid Mrocheń, mgr inż., Instytut Mechaniki Górotworu PAN w Krakowie, Pracownia Odkształceń Skał, specjalizacja geodezja i kartografia, doktorant AGH - w pracy wykorzystuje zobrazowania satelitarne i systemy informacji przestrzennej do analiz zmian powierzchni terenu. dawid.mrochen@imgpan.pl

Artur Wójcik, mgr inż., Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska; Katedra Ochrony Terenów Górniczych, Geoinformatyki i Geodezji Górniczej, specjalista w dziedzinie badań (metodami geodezyjnymi) i analiz wpływu eksploatacji górniczej na powierzchnię terenu. awoj@agh.edu.pl