

## ZASTOSOWANIE METOD GEOMORFOMETRYCZNYCH W ANALIZIE DEFORMACJI POWIERZCHNI TERENU SPOWODOWANYCH DZIAŁALNOŚCIĄ GÓRNICZĄ NA PRZYKŁADZIE KOPALNI „NOWY KOŚCIÓŁ” („STARE ZAGŁĘBIE MIEDZIOWE”, SYNKLINORIUM PÓŁNOCNOSUDECKIE)

### APPLICATION OF GEOMORPHOMETRIC METHODS IN MINING-RELATED GROUND DEFORMATION ANALYSIS – AN EXAMPLE OF THE “NOWY KOŚCIÓŁ” COPPER MINE (“THE OLD COPPER BASIN”, NORTH-SUDETIC SYNCLINORIUM)

ALEKSANDER KOWALSKI<sup>1</sup>, KRZYSZTOF MACIEJAK<sup>2</sup>

**Abstrakt.** Podczas kartograficznych badań terenowych prowadzonych od października 2015 r. w okolicach miejscowości Nowy Kościół, na Pogórzu Kaczawskim w Sudetach Zachodnich, rozpoznano i zinwentaryzowano wiele form wskazujących na przekształcenia powierzchni terenu związane z działalnością górniczą. Kilkanaście zapadlisk, rowów i obniżeń na terenie dawnych Zakładów Górniczych (ZG) „Nowy Kościół” zaobserwowano również podczas analiz numerycznych modeli terenu oraz zdjęć satelitarnych. Określono zasięg tych form, opisano ich parametry przestrzenne i oszacowano maksymalne obniżenie powierzchni terenu w ich obrębie. Obniżenia powierzchni terenu na tym obszarze nie były jak dotąd tak szczegółowo opisane. Głównym celem przeprowadzonych badań było określenie przydatności metod geomorfometrycznych, opartych na analizie wysokorozdzielczych numerycznych modeli terenu (NMT) LiDAR, do jakościowego i ilościowego opisu deformacji powierzchni spowodowanych podziemną działalnością górniczą.

**Słowa kluczowe:** geomorfometria, GIS, deformacje powierzchni terenu, „Stare Zagłębienie Miedziowe”.

**Abstract.** During mapping work carried out since October 2015 in the Nowy Kościół area in the Kaczawskie Foothills, Western Sudetes, a number of morphological forms were identified and catalogued. They indicate surface transformation due to ceased mining activity. Several depressions and grabens were recognized during the digital terrain model and satellite images analysis. The range of deformation has been determined, and their spatial parameters and the maximal depression of the ground level within the mining area have been estimated and described. Such ground level depressions have not been examined in detail before. The main aim of the studies was to determine the usefulness of geomorphometric methods based on LiDAR digital elevation models (DEM) for the purposes of high quality description of surface deformation caused by underground mining operations.

**Key words:** geomorphometry, GIS, mining ground deformations, “The Old Copper Basin”.

## WSTĘP

Wielkoskalowe deformacje powierzchni terenu spowodowane podziemną działalnością górniczą są zjawiskiem dobrze rozpoznany i były szeroko opisywane w literaturze (np. Borecki, 1980; Dulias, 2003; Kaszowska, 2007;

Mazurek, 2014). Powszechnie stosowany podział na deformacje ciągłe i nieciągłe uwzględnia różny stopień odkształceń powierzchni terenów górniczych (Szpetkowski, 1978). Do deformacji nieciągłych zalicza się m.in. szczeliny,

<sup>1</sup> Uniwersytet Wrocławski, Instytut Nauk Geologicznych, pl. Maksa Borna 9, 50-204 Wrocław; e-mail: aleksander.kowalski@uwr.edu.pl.

<sup>2</sup> Badacz historii górnictwa, e-mail: krzysztof@maciejak.pl.

zapadliska i leje, które związane są z gwałtownym obniżeniem powierzchni terenu ponad przestrzenią eksploatacyjną w górotworze. Deformacje ciągle występują najczęściej na obszarach płytkiej eksploatacji podziemnej prowadzonej z zawałem lub ugięciem stropu (Chudek i in., 1979). Są to przede wszystkim niecki osiadań powstające przez powolne ugięcie skał ponad wyrobiskami górnictwami. Powierzchnia i głębokość form powstałych w wyniku deformacji zależy m.in. od warunków hydrogeologicznych, głębokości eksploatacji złoża oraz właściwości reologicznych skał nadkładu (Borecki, 1980). Głównymi metodami stosowanymi obecnie w pomiarach powierzchniowych szkód górniczych są metody geodezyjne oparte na tradycyjnej niwelacji terenu (np. Głowacki, 2009), jak również pomiary z użyciem systemu GPS (ang. *Global Positioning System*, np. Sokoła-Szewiła, 2011). W badaniach nad przemieszczeniami pionowymi na terenach górniczych podejmowano również

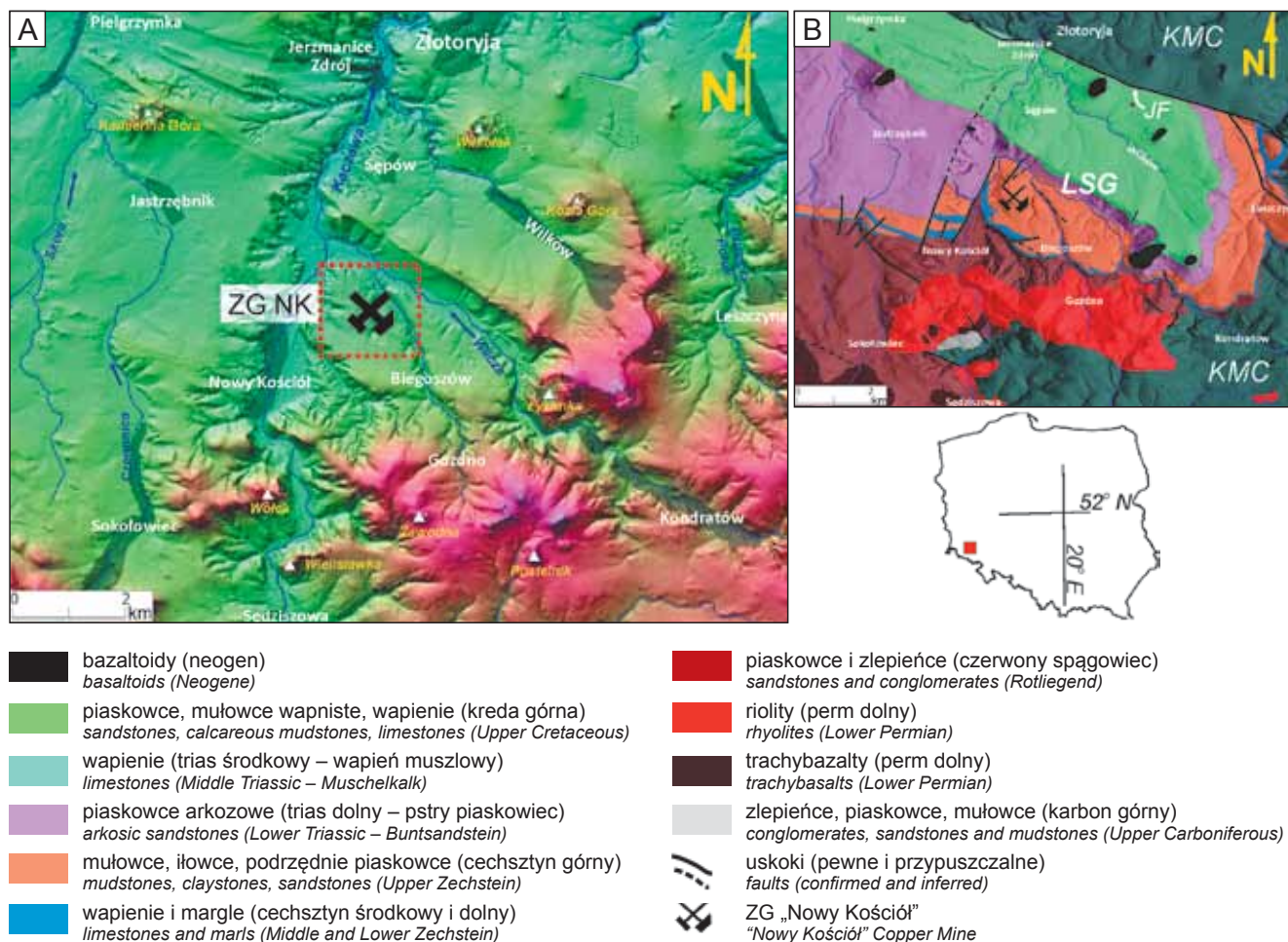
próby zastosowania numerycznych modeli powierzchni terenu (NMT) opartych na cyfryzacji archiwalnych materiałów kartograficznych oraz na metodach satelitarnej interferometrii radarowej (Wojciechowski, 2007). Nowe możliwości w analizie i opisie ukształtowania powierzchni terenu pojawiły się wraz z upowszechnieniem wysokorozdzielczych numerycznych modeli terenu (NMT) LiDAR (ang. *Light Detection and Ranging*) uzyskiwanych z danych pochodzących z tzw. lotniczego skaningu laserowego (ang. ALS – *Airborne Laser Scanning*). Modele wysokościowe oparte na danych LiDAR znalazły szerokie zastosowanie w badaniach geomorfologicznych (np. Baldo i in., 2009; Migoń i in., 2013; Wójcik i in., 2013) i geologicznych (np. Webster i in., 2006; Engelkemeir i Khan, 2007; Wojewoda i in., 2011). W niniejszej pracy podjęto próby zastosowania metod geomorfometrycznych opartych na NMT LiDAR w analizie deformacji powierzchni terenu spowodowanych działalnością górniczą.

## POŁOŻENIE I BUDOWA GEOLOGICZNA OBSZARU BADAŃ

Zgodnie z obowiązującymi podziałami fizycznogeograficznymi obszar badań znajduje się na terenie Pogórza Złotoryjskiego – mniejszej jednostki wchodzącej w skład mezoregionu Pogórza Kaczawskiego w Sudetach Zachodnich (Kondracki, 2002). Kopalnia „Nowy Kościół” położona jest w obrębie jednostki geologiczno-strukturalnej określanej w literaturze jako synklina (Peryt, 1978) lub półrów Leszczyny (Cymerman, 2004). Czasami stosowana jest również nazwa synklina złotoryjska (np. Kaczmarek, Rożek, 2008). W niniejszej pracy autorzy stosują termin półrów Leszczyny. Jest to regionalna jednostka niższego rzędu, stanowiąca południowo-wschodni fragment synklinorium północnosudeckiego (fig. 1A), zbudowana ze skał osadowych permu (czerwonego spągowca i cechsztynu), triasu (pstręgo piaskowca i wapienia muszlowego) oraz kredy górnej (cenomanu i turonu). Skały osadowe są przecięte żyłowymi wystąpieniami neogeńskich bazaltoidów tworzących obecnie ostańcowe wzgórza (neki). Półrów Leszczyny ograniczają od południa wychodnie permskich skał wulkanicznych zaliczanych do formacji z Wielisławki (Śliwiński i in., 2003) oraz utwory metamorfiku kaczawskiego (fig. 1B). Północną granicę jednostki stanowi uskoki Jerzmanic (fig. 1B). Na wschodzie utwory osadowe półrowu Leszczyny leżą bezpośrednio na podłożu metamorficznym. Budowa geologiczna tego obszaru znajduje swoje odzwierciedlenie w morfologii terenu w formie rozległego obniżenia (niecki) o orientacji dłuższej osi NW–SE. W obrzeżeniu i w części centralnej niecki występują asymetryczne grzbiety o łagodnych stokach, zgodnych z regionalnym nachyleniem skał osadowych (do 15°) w kierunku północnym i północno-wschodnim.

Przedmiotem głębinowej eksploatacji w Zakładach Górniczych „Nowy Kościół” (jedna z trzech kopalń „Starego Zagłębia Miedziowego”) były miedzionośne utwory dolnego cechsztynu zaliczane do cyklotemu Werra (PZ1; Śliwiński i in., 2003). Ich stratygrafia i wykształcenie facjalne były przedmiotem licznych opracowań i dyskusji (np. Gunia,

Milewicz, 1962; Niškiewicz, 1967; Milewicz, 1981; Raczyński, 1997). Na potrzeby kartografii górniczej i opisów stosowanych w złożowych dokumentacjach geologicznych stosowano zazwyczaj tradycyjne podziały litostratygraficzne opracowane w XX w. (Machoń, 1967; Skowronek, 1967). W półrowie Leszczyny profil dolnego cechsztynu rozpoczynają zlepieńce (tzw. zlepieńce podstawowe lub graniczne) i piaskowce zalegające na klastycznych utworach czerwonego spągowca lub bezpośrednio na skałach metamorfiku kaczawskiego. Zlepieńce i piaskowce są uznawane za utwory transgresywne tzw. morza cechsztyńskiego (np. Peryt, 1978). Przechodzą one stopniowo w wapienie (tzw. cechsztyński wapień podstawowy) z przewarstwieniami ilowców o miąższości do 7 m (Śliwiński i in., 2003). W wyższej części profilu wapienie zastępowane są utworami marglisto-wapiennymi w obrębie których, idąc od dołu, tradycyjnie wyróżnia się tzw. margle plamiste (do 3 m miąższości), margle miedzionośne (2,8–3,2 m) i margle ołowionośne (ok. 3 m). W kopalni „Nowy Kościół” eksploatowano górną część margli miedzionośnych i dolną część margli ołowionośnych okruszczoną głównie siarczkami i tlenkami Cu (0,5–0,6%), Pb, Zn i Fe. We wschodniej części synklinorium północnosudeckiego miedzionośne utwory węglanowe dolnego cechsztynu przykryte są serią piaszczysto-mułowcową z wkładkami ilów (tzw. ily septariowe) i dolomitów, zaliczaną do cechsztynu górnego (Raczyński, 1997). Miąższość tych utworów sięga 35 m. Powyżej utworów górnego cechsztynu występują piaszczysto-żwirowe osady pstręgo piaskowca zaliczane do formacji z Radłówki (Milewicz, 1985). Wyżejleżące utwory węglanowe retu i dolnego wapienia muszlowego, zaliczane w synklinorium północnosudeckim do formacji z Raciborowic (Milewicz, *op. cit.*), występują w północnej części synkliny Leszczyny wyłącznie w formie reliktoowo zachowanej pokrywy w sąsiedztwie uskoku Jerzmanic. Płytkomorskie utwory kredy górnej (górnego cenomanu, turonu) są najmłodszymi osadami przykrywającymi niezgodnie starsze skały synklinorium północnosudeckiego.



**Fig. 1. Położenie (A) i budowa geologiczna (B) okolic Zakładów Górniczych „Nowy Kościół” (ZG NK)**

LSG – półród Leszczyny; KMC – metamorfik kaczawski; JF – uskók Jerzmanic. Podkład – NMT LiDAR 1 x 1m. Mapa geologiczna na podstawie badań własnych i opracowań kartograficznych (Jerzmański, 1955; Frąckiewicz, 1955; Milewicz, Jerzmański, 1956–57; Milewicz, Kozdrój, 1991)

Location (A) and geological setting (B) of the “Nowy Kościół” Copper Mine (ZG NK) area

LSG – Leszczyna Semi-Graben; KMC – Kaczawa Metamorphic Complex; JF – Jerzmanice Fault. Maps are superimposed over LiDAR DEM with a resolution of 1 metre. Geological map based on author’s studies and maps (Jerzmański, 1955; Frąckiewicz, 1955; Milewicz, Jerzmański, 1956–57; Milewicz, Kozdrój, 1991)

## HISTORIA WYDOBYCIA RUD MIEDZI W REJONIE NOWEGO KOŚCIOŁA

Najstarszy dokument informujący o eksploatacji rud miedzi w rejonie Nowego Kościoła pochodzi z 1506 r. (Wutke, 1900) i mówi o sprzedaży miedzi, porozumieniu w sprawie budowy kopalni i zakładu górniczego. Nie jest wykluczone, że wydobycie w tym rejonie rozpoczęło się na wychodniach skał cechsztynu w rejonie Sokółowca nad Czermnica, gdzie do dziś występują stare hałdy i zapadliska wraz z kamieniami granicznymi wyznaczającymi prawdopodobnie zasięg działek górniczych. Przypuszczalny wiek najstarszych kamieni zlokalizowanych po zachodniej stronie doliny Kaczawy, między Nowym Kościołem a Krzeniowem, to nawet późne średniowiecze (Maciejak, Maciejak, 2016). Nowsze zapiski pochodzą z 1711 r., kiedy to cesarzowa rzymsko-niemiecka Eleonora Magdalena Teresa von Pfalz-Neuburg wydała

Johannesowi Bernardowi von Koburg zezwolenie na poszukiwanie m.in. miedzi w Nowym Kościele (Wutke, 1900). W latach 1734–1736 r. trwały prace górnicze w rejonie pobliskiego Kondratowa, Leszczyny i w Nowym Kościele. W 1738 r. hrabia Frankenberg z Grodzca otrzymał nadanie na poszukiwanie rud miedzi w tym rejonie. Rudę kruszył początkowo w starej kruszarni w Górzycy pod Lwówkiem, a następnie w zakładzie w rejonie Nowego Kościoła. Prace ustały na przełomie lat 1738 i 1739 (Fechner, 1903). Zainteresowanie ponownym wydobyciem miedzi na tym obszarze wzrosło w czasie I wojny światowej. Odkrywkowa eksploatacja skał miedzionośnych w tutejszym kamieniołomie była znacznie tańsza niż budowa kopalni podziemnej, zwłaszcza że towarzyszyła eksploatacji prowadzonej na potrzeby



przemysłu cementowego. Koniec wojny przyczynił się do wygaszenia działalności górniczej. Dopiero w 1929 r. w rejonie Nowego Kościoła przeprowadzono dwa nowe otwory

poszukiwawcze, w których potwierdzono okruszcowanie w marglistych utworach cechsztynu na głębokościach 56,00–58,50 m oraz 80,15–83,50 m.

## HISTORIA I SPOSOBY EKSPLOATACJI W ZAKŁADACH GÓRNICZYCH „NOWY KOŚCIÓŁ”

Do eksploatacji rud miedzi w rejonie Nowego Kościoła powrócono po II wojnie światowej. Budowę kopalni ukończono w 1954 r., a od 1957 r. Zakład Górniczy „Nowy Kościół” przekształcono w przedsiębiorstwo eksploatacyjne. Do 30.11.1968 r., a więc do momentu likwidacji kopalni, wydobyto z niej 4 154 515 ton rudy, z której otrzymano 21 400,3 ton czystej miedzi. Średnia zawartość metalu wahała się od 0,5 do 0,55% Cu (Maciejak, Maciejak, 2016). Złoże udostępniono główną sztolnią wydobywczą (fig. 2B) założoną na osi wschód–zachód, zgodnie z biegiem skał osadowych cechsztynu, od której poprowadzono dwie pierwsze sztolnie upadowe w kierunku północnym. Równoległe do nich założono piętrowy chodnik i przekop zamykający złoże chodnika wodnego. Złoże między główną sztolnią a przekopem podzielono na panele ścianowe (Projekt wstępny..., 1952). W sumie przez wszystkie lata działalności kopalni wydrążono sześć upadowych. Wysokość wyrobisk ścianowych w kopalni wynosiła 2,15–2,50 m. W rejonie północnego krańca Upadowej IV w 1958 r. zgłębiono do 90 m szyb „Wacław” (fig. 2A), wykorzystywany głównie do celów wentylacyjnych, a następnie odwadniających.

W pierwszych latach działalności kopalni stosowano system eksploatacji z podsadzką hydrauliczną. W latach

1962–1963 wprowadzono system ścianowy podłużny. Długość ścian wynosiła 40–70 m (Projekt wstępny..., 1952). Wraz z postępem prac, strop zabezpieczano drewnianymi stosami układanymi w szachownice, które wypełniano blokami wapieni (metoda elastycznego ugięcia stropu). Odległość między osiami stosów w tym samym rzędzie wynosiła 4 m, a od frontu ściany nie mogła przekraczać 4 m. Taki strop elastycznie ugiął się, osiadał i rozgniatał kolejne stopy. Szybkość osiadania zależała od rozmiaru eksploatacji i warunków geologicznych (Dychtowicz i in., 1966). System ten dawał pozytywne wyniki w zakresie bezpieczeństwa. Jak się okazało, jego wadą było duże zużycie drewna, które wynosiło średnio 0,04 m<sup>3</sup> na 1 tonę rudy, a związane z tym straty ekonomiczne sięgały 110 kg na 1 tonę wydobytej rudy (Projekt wstępny..., 1952). W związku z tym podjęto decyzję o kierowaniu stropem przez zawał. Początkowo sposób ten wprowadzono w kopalni „Nowy Kościół”, a następnie w kopalni „Lena” w pobliskim Wilkowie. Mając na uwadze małą głębokość wyrobisk, musiało się to odbyć kosztem stabilności gruntu na powierzchni terenu. Eksploatacja prowadzona na zawał powodowała powstanie licznych deformacji nieciągłych (Błażejczak, 1968). W 1968 r. Zakłady Górnicze „Nowy Kościół” postawiono zlikwidować, 31 grudnia 1968 r. kopalnia przestała istnieć.

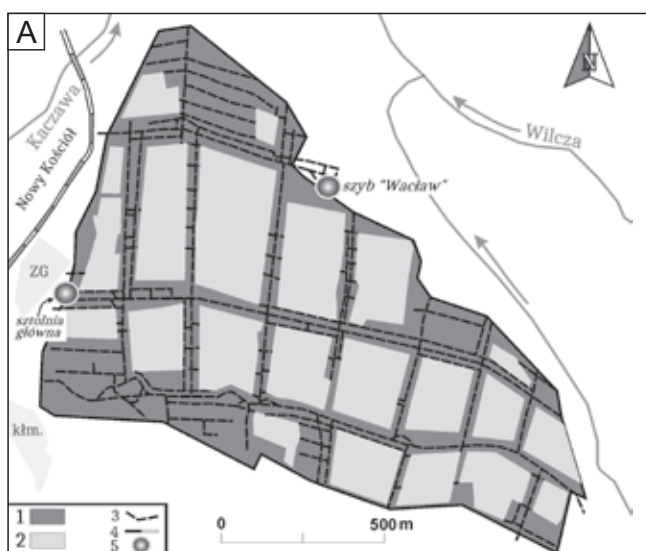


Fig. 2. Plan kopalni „Nowy Kościół” (A). Górnicy przy sztolni głównej ZG „Nowy Kościół” (B) (fot. arch. ze zbiorów J. Paździora)

ZG – budynek Zakładów Górniczych, kłm – nieczynny kamieniołom, 1 – teren kopalni, 2 – wyrobiska ścianowe, 3 – wyrobiska chodnikowe, 4 – linie kolejowe, 5 – szyby i sztolnie główne

Simplified scheme of the “Nowy Kościół” Copper Mine (A). Miners and an adit of the “Nowy Kościół” Copper Mine (B) (archival photo, collected by J. Paździor)

ZG – mine building, kłm – abandoned quarry, 1 – mining area, 2 – longwall excavations, 3 – main gates, 4 – railway lines, 5 – shafts and adits

## METODY BADAŃ

Badania terenowe nad uszkodzeniami górnictwa w okolicach miejscowości Nowy Kościół prowadzono w latach 2015–2016. Kartograficzne prace terenowe polegały na dokumentowaniu i opisie deformacji powierzchni terenu (fig. 3) z użyciem precyzyjnych odbiorników GPS Nomad Trimble (aplikacja ArcPad) oraz PENTAGRAM PathFinder Logger P3106. Wykonano pomiary długości i szerokości form morfologicznych oraz wyznaczono ich zasięg w terenie. W oprogramowaniu ArcPad wykonano szkice geomorfologiczne (format .shp) antropogenicznych form powierzchni terenu związanych z działalnością górnictwa. Przeprowadzono kwerendę zasobów archiwalnych ZG „Nowy Kościół” (dokumentacje geologiczne, raporty z likwidacji kopalni, materiały kartograficzne) ze zbiorów Archiwum Państwowego we Wrocławiu – oddział w Legnicy. W dalszej kolejności wykonano analizę rastrowych, numerycznych modeli terenu (NMT) LiDAR o rozdzielczości ok.  $1 \times 1$  m (fig. 4A, B). Rozdzielczość pionowa analizowanych modeli terenu wynosi średnio 0,05–0,15 m, przy maksymalnym błędzie wysokości nie przekraczającym 0,3 m (Raport dostawy..., 2011). Modele LiDAR porównano z dostępnymi zdjęciami satelitarnymi o średniej rozdzielczości (fig. 4D) i mapami topograficznymi. Do analiz wykorzystano oprogramowanie Move (Midland Valley) v. 2015.2, Surfer (Golden Software) v. 9.0, oraz MicroDEM v. 2015.8.21.

Na podstawie rastrowego modelu LiDAR wykonano mapy cieniowanego reliefu (ang. *shaded relief maps*, fig. 4A) w skali szarości o różnym kierunku i kącie oświetlenia, mapy poziomicowe o cięciu 1 m, mapy spadków terenu (fig. 4C) i mapy kierunków nachylenia stoku. Na podstawie zidentyfikowanych w terenie form (rozległe obniżenia, wydłużone wały o łagodnych stokach, załamania powierzchni stoku) oraz wykonanych map wstępnie wyznaczono zasięg deformacji powierzchniowych spowodowanych działalnością górnictwa. Określono podstawowe parametry morfologiczne tych form (tab. 1).

Podjęto próby wyznaczenia pierwotnej rzeźby obszaru objętego ruchami pionowymi (fig. 5). W tym celu z modelu terenu LiDAR usunięto punkty tworzące model w obrębie wewnętrznej części obniżeń powstałych w wyniku osiadania i interpolowano nową siatkę punktów o rozdzielczości  $1 \times 1$  m na bazie pozostałego fragmentu terenu nieobjętego ruchami pionowymi. W przypadku fragmentów stoków nachylonych pod zmiennym kątem możliwa była precyzyjna rekonstrukcja jego wypukłych, wklęsłych lub prostoliniowych odcinków (fig. 5A, B). Z tak wygenerowanej siatki punktów stworzono trójwymiarowe modele powierzchni, które posłużyły do wykonania map różnicowych (fig. 5C, D). Mapy różnicowe zostały wygenerowane dla każdego obniżenia powierzchni terenu spowodowanego działalnością górnictwa.

Tabela 1

### Charakterystyka morfometryczna form zapadliskowych na terenie kopalni „Nowy Kościół”

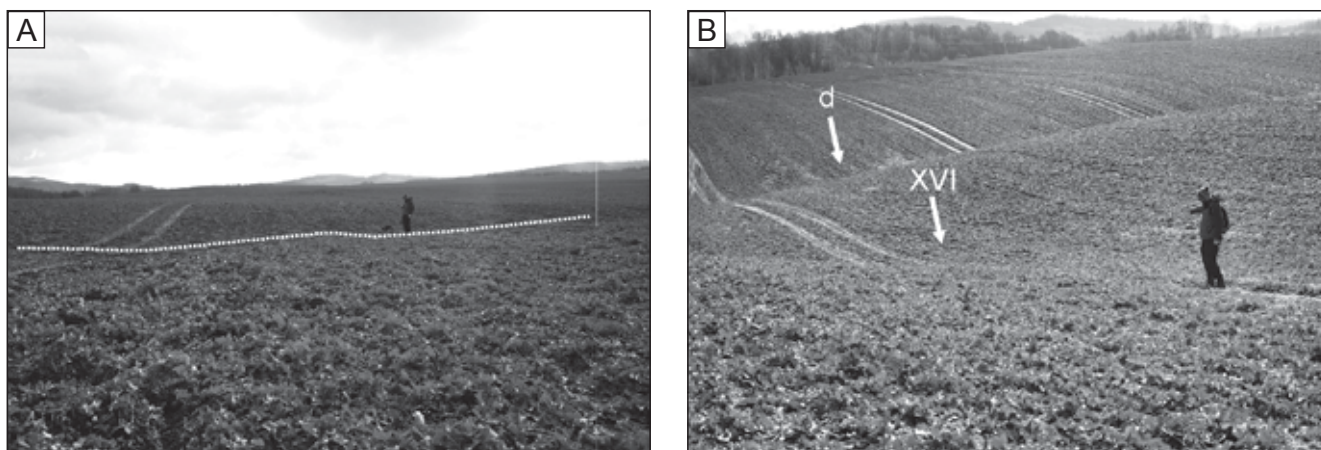
Morphometry of the mining sinkholes in the “Nowy Kościół” Copper Mine area

Nr zapadliska	Powierzchnia [m <sup>2</sup> ]	Maks. obn. pow. [m] (Wmax)/ obniżenie [m] wg danych arch.	Wys. maks. [m n.p.m.]	Wys. min. [m n.p.m.]	Maks. nach. stoku (o)
I	42 080	0,79	257,5	254,7	12,75
II	84 800	1,76	262,4	249,2	10,07
III	61 300	1,78	261,9	236,6	14,90
IV	27 680	1,66	260,3	234,1	27,20
V	35 290	1,60	267,4	247,7	25,46
VI	17 950	1,57	267,1	261,4	6,77
VII	9140	2,21	269,7	266,7	7,34
VIII	10 470	1,34	267,0	249,2	15,60
IX	18 620	1,31	269,4	263,0	7,41
X	20 210	1,81	272,5	260,0	3,85
XI	12 150	<b>2,43/2,187*</b>	271,4	256,8	17,80
XII	8920	1,63	269,4	265,8	6,64
XIII	30 650	2,08	277,7	256,8	14,03
XIV	18 220	<b>2,24/1,966</b>	278,2	266,5	10,26
XV	24 870	<b>2,35/2,111</b>	274,4	269,1	9,27
XVI	5910	<b>2,32/1,949</b>	272,1	265,0	15,24

\* Pogrubioną czcionką zaznaczono najwyższe wartości przemieszczeń w obrębie zapadlisk (na podstawie danych LiDAR) oraz dostępne pomiary geodezyjne (Dychtowicz i in., 1966)

\* The maximum displacement values within depressions (based on LiDAR data) and values of available geodetic measurements are marked in bold (Dychtowicz *et al.*, 1966)



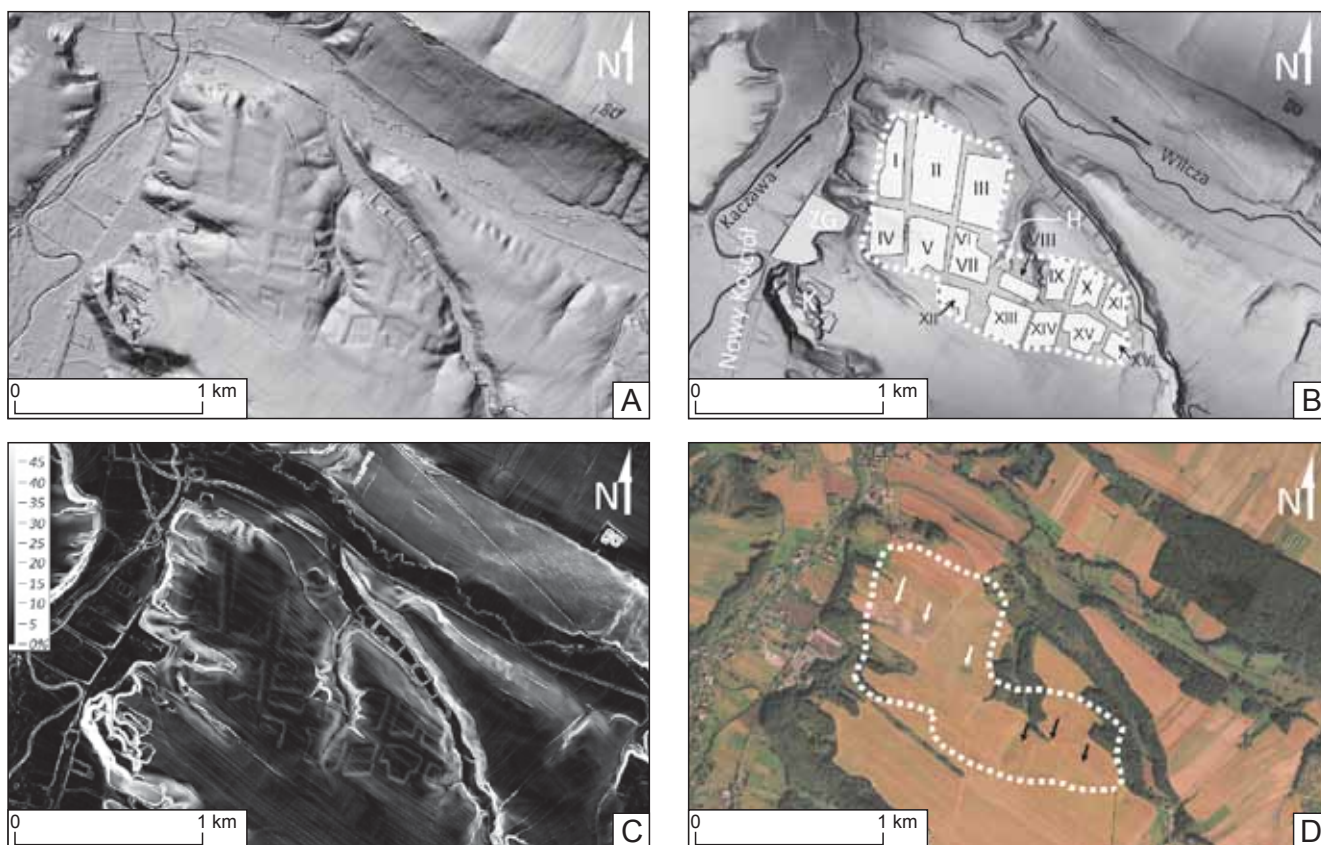


**Fig. 3. Przykłady deformacji terenu na obszarze ZG „Nowy Kościół”**

A – rozległe obniżenie terenu (forma nr XII) o głębokości ok. 1,5 m; B – przykład zapadliska w terenie o urozmaiczonej rzeźbie (forma nr XVI, d – sucha dolina)

Examples of mining-related ground deformation in the “Nowy Kościół” Copper Mine area

A – extensive depression (XII), up to 1.5 m deep; B – an example of depression in the area with diversified relief (XVI, d – dry valley)

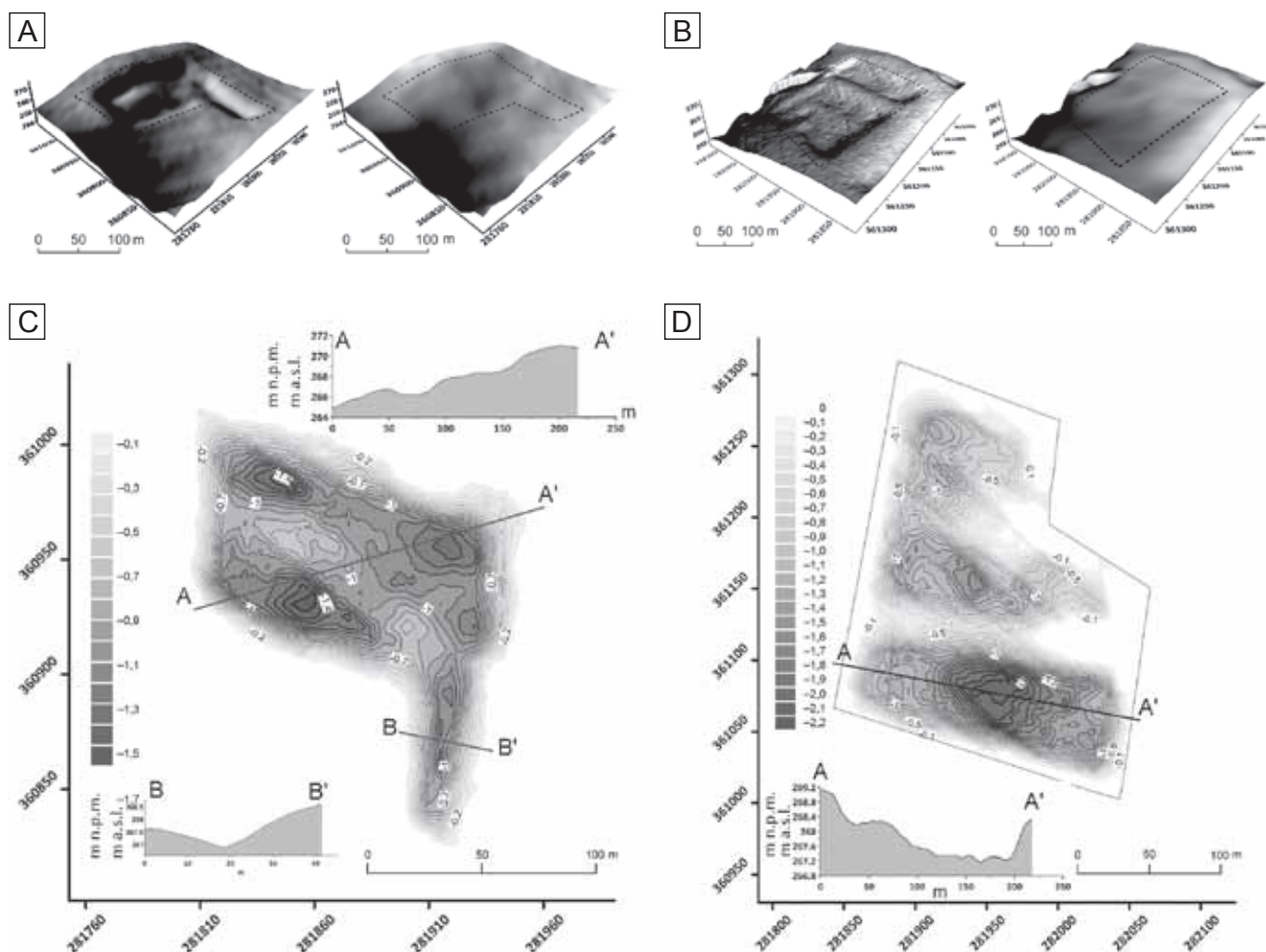


**Fig. 4. Deformacje powierzchni terenu na obszarze kopalni „Nowy Kościół” na obrazach lidarowych (A, B, C) oraz na zdjęciu satelitarnym o średniej rozdzielczości (D) (źródło: Google Maps – Landsat 8)**

A – mapa cieniowanego reliefu okolic kopalni „Nowy Kościół” z wyraźnymi zapadliskami; B – zasięg obniżen określony na podstawie NMT LiDAR i badań kartograficznych; C – mapa spadków wygenerowana na podstawie NMT LiDAR; D – zdjęcie satelitarne z zaznaczonym obszarem badań; białymi strzałkami oznaczono podmokłe części zapadlisk, czarnymi strzałkami – najgłębsze zapadliska na południu obszaru badań

Mining-related ground deformation in the “Nowy Kościół” Copper Mine area on the LiDAR DEM (A, B, C) and on the medium-resolution satellite image (D) (source: Google Maps – Landsat 8)

A – shaded relief map of the “Nowy Kościół” Copper Mine area; B – scheme of distinctive depressions identified based on LiDAR dem and mapping; C – slope map derived from LiDAR DEM; D – satellite image with the study area marked; white arrows indicate wetlands in shallow depressions, black arrows show the deepest mining sinkholes in the south of the study area



**Fig. 5. Modele i mapy różnicowe zapadliska nr XII (A, C) oraz VI/VII (B, D) wykonane na podstawie NMT LiDAR (A, B – wykresy z lewej strony) oraz rekonstrukcji pierwotnej rzeźby obszarów objętych ruchami pionowymi (A, B – wykresy z prawej strony)**

Przekroje zaznaczone na mapach różnicowych wykonano na bazie NMT LiDAR. Skale na rycinach 3D (osie): współrzędne metryczne PUWG 1992/19 (Poland 1992)

Elevation models and differential maps of sinkholes XII (A, C) and VI/VII (B, D) based on NMT LiDAR (A, B – graphs on the left) and on reconstructions of the relief before the deformation (A, B – graphs on the right).

Cross-sections marked on the differential maps were constructed based on LiDAR DEM. Scales on pictures 3D (axes): metric coordinates PUWG 1992/19 (Poland 1992)

Mapy różnicowe powstały przez odjęcie siatki punktów zrekonstruowanego modelu pierwotnej rzeźby stoku od siatki tworzącej rzeczywisty model NMT Lidar o takiej samej rozdzielczości. Umożliwiło to precyzyjną ocenę przemieszczeń

pionowych i ich rzeczywisty rozkład w obrębie obniżzeń. Uzyskane wartości przemieszczeń pionowych porównano z geodezyjnymi pomiarami wykonywanymi w czasie eksploatacji prowadzonej w latach 60. XX w. (Dychtowiec i in., 1966).

## DEFORMACJE POWIERZCHNI TERENU NA TERENIE KOPALNI „NOWY KOŚCIÓŁ” I WYNIKI ANALIZ GEOMORFOMETRYCZNYCH

Szkody górnicze na południu obszaru badań zostały opisane przez dozór górniczy kopalni w trakcie eksploatacji płytkich partii złoża w latach 50. i 60. XX w. (Dychtowiec i in., 1966; Błażejczak, 1968). Od 1955 r. prowadzono ciągłe pomiary w celu oszacowania wpływu eksploatacji na powierzchnię terenu. Obserwacje prowadzono początkowo

co tydzień, później co miesiąc (Dychtowiec i in., 1966). W pracy Dychtowiec i in. (1966) zamieszczono informacje o osiadczeniu potwierdzonym pomiarami w czterech geodezyjnych punktach reperowych. Szkody górnicze miały bezpośredni i pośredni związek z eksploatacją (Błażejczak, 1968). Do szkód bezpośrednich zaliczono wówczas defor-



macje powierzchni i szkody powstałe w budynkach mieszkalnych i gospodarczych, a do szkód pośrednich zjawiska zaniku wody w studniach, jak i szkody spowodowane budową miejscowego wodociągu. W archiwalnej dokumentacji natrafiono na informacje o występowaniu na polach rówów o głębokości do 1,5 i szerokości 4–5 m. Deformacje nieciągłe odnotowywano zazwyczaj na powierzchni terenu nad miejscem, gdzie eksploatacja odbywała się na głębokości mniejszej niż 60 m. Nadkład piaszczysto-mułowcowych utworów cechsztynu górnego wynosi na tych obszarach od 5 do 40 m. Równoległe do przodka ścianowego, nad przesuającym się frontem eksploatacji, tworzyły się szczeliny, progi i zapadliska o szerokości dochodzącej do 30 cm i głębokości ok. 1,5 m. Formy te występowały na powierzchni powyżej wyrobisk ścianowych wypełnianych kasztem (Plan likwidacji..., 1968). Na północy badanego obszaru, w miejscach głębszej eksploatacji (nadkład do 70 m), powstawały nieckowate zagłębienia, które okresowo wypełniała woda utrudniająca prowadzoną działalność rolniczą (Błażejczak, 1968). Z obserwacji mierniczych prowadzonych w tamtym czasie na terenie górniczym wynikało, że przemieszczenia pionowe „zachodzą wolno, a ruchy na powierzchni ustają po ok. 3 miesiącach po zakończeniu eksploatacji” (Błażejczak, *op. cit.*). Obliczono wówczas współczynnik osiadania dla prowadzonej eksploatacji z zawałem stropu, który wynosił ok. 0,9 dla maksymalnych obniżen powierzchni terenu rzędu 1,9–2,1 m. Z informacji ustnych, które autorzy otrzymali od obecnego właściciela pola położonego nad kopalnią, wynika, że w okresie 2010–2014 dochodziło do powstawania nad starymi wyrobiskami zapadlisk o średnicy 5–10 m.

Powierzchniowe deformacje obserwowane obecnie w okolicach kopalni „Nowy Kościół” obejmują obszar 1,055 km<sup>2</sup>. Różnice wysokości są na tym terenie niewielkie i sięgają ok. 52 m. Większe deniwelacje wynikają z sąsiedztwa doliny Kaczawy na zachodzie, jak również potoków

rozcinających obszar badań w części wschodniej i północnej (fig. 1A). Zaobserwowane deformacje przyjmują formę prostokątnych lub wielokątnych w zarysie obniżeń/zapadlisk o dłuższych bokach o długości od 120 do 460 m i całkowitej powierzchni 5910–84 800 m<sup>2</sup>. Zapadliska ograniczone są prostoliniowymi wałami o nachyleniu stoków wewnętrznych 1,8–8,8°.

Stoki zewnętrzne wałów są słabiej nachylone pod kątem ok. 1,5°. Morfologia dna i głębokość obniżeń pomiędzy wałami jest zróżnicowana (tab. 1). Wyższe wartości nachylenia stoków (nawet do 27°) w obrębie zapadlisk są spowodowane sąsiedztwem dolin potoków (tab. 1; fig. 1A). W większości przypadków (np. formy nr I, II, III, V) centrum zapadliska jest wypukłe, a maksymalne obniżenie terenu występuje w strefach brzeżnych przylegających do wałów. Asymetria dna form zapadliskowych przejawia się również w występowaniu asymetrycznych stopni i progów (fig. 5A, B). Największe wartości obniżenia w obrębie zapadlisk (do ok. 2,4 m) stwierdzono w południowej części obszaru badań (formy nr XI, XIV, XV, XVI), najmniejsze zaś (do ok. 0,8 m) w północnej (obniżenia o łagodnych zarysach nr I, II, III).

W najniższych częściach zapadlisk gromadzi się okresowo woda utrudniająca prowadzenie działalności rolniczej. Zastoiska i małe zbiorniki wodne widoczne są również na zdjęciach satelitarnych obszaru wykonanych przed 2015 rokiem (fig. 4D). W północno-zachodniej części obszaru badań w latach 2014–2015 przeprowadzono prace melioracyjne, które miały na celu stałe odwodnienie terenów wykorzystywanych rolniczo. Wykonano w tym celu wąski rów o szerokości ok. 2 m, do którego doprowadzono rury drenażowe. Efektem tych prac było znaczne osuszenie tego fragmentu obszaru badań położonego w obrębie zapadlisk I i II. Na ścianach rowu o wysokości ok. 1,5 m występują obecnie spękania i małe osuwiska, które mogą wskazywać na współczesne ruchy pionowe ponad wyrobiskami kopalni.

## PODSUMOWANIE I Dyskusja

Przynależność opisanych form do wyróżnianych zwyczajowo w literaturze (Szpetkowski, 1978) grup deformacji ciągłych i nieciągłych nie jest jednoznaczna. Obniżenia położone w części północnej (I, II, III) mają cechy zbliżone do niecek osiadań (płaskie dno, niewielkie nachylenie stoków w strefie wewnętrznej, brak wyraźnych progów i szczelin). Pomimo tego, w trakcie prowadzonych prac górniczych obniżenia te zostały zaliczone przez dozór górniczy do grupy deformacji nieciągłych. Obniżenia położone w części południowej obszaru badań nie spełniają kryteriów geometrycznych rozkładu wskaźników deformacji w obrębie niecki osiadań (Staroń, 1995). W ich obrębie występują mniejsze formy, takie jak słabo zaznaczające się rowy i progi. Formy te są najprawdopodobniej bezpośrednim odzwierciedleniem sposobu eksploatacji i łamania stropu wyrobisk – kontrolowane zawały odbywały się w interwałach co 1,2 m, co z kolei prowadziło do powstania szczelin oddalonych od siebie o taką samą wartość. Progi w obrębie zapadlisk powstawały

zaś w wyniku zaciskania powstających szczelin (Dychtowicz i in., 1966). Progi te zostały częściowo zatarte przez prowadzoną działalność rolniczą po likwidacji kopalni.

Deformacje górnicze z okolic Nowego Kościoła nawiązują bezpośrednio swym zasięgiem i kształtem do wyrobisk ścianowych kopalni, w których prowadzono eksploatację połączoną z ugięciem lub zawałem stropu (por. fig. 2A i 4A). Pomędzy wyrobiskami ścianowymi utworzono wówczas filary ochronne o szerokości do 100 m, co znalazło swoje odzwierciedlenie w dzisiejszej morfologii terenu. Ponad filarami rozdzielającymi wyrobiska ścianowe osiadanie obecnie nie występuje – zapadliska powstałe w wyniku wybrania przestrzeni eksploatacyjnej rozdzielone są na powierzchni terenu podłużnymi wałami odpowiadającymi filarom ochronnym (fig. 4B). Dodatkowo w obrębie filarów poprowadzono wyrobiska chodnikowe (fig. 2A), które były wzmacniane obudową sztywną lub łuków podatnych (LP). Wyrobiska te nie uległy prawdopodobnie znacznemu zaci-



śnięciu. W terenie o znacznym nachyleniu stoków (zbocza suchych dolin, doliny potoków) wyraźne ślady ruchów pionowych nie są widoczne (fig. 4A, B). Wyraźne zapadliska nie występują również w części północnej terenu górniczego (okolice ujścia potoku Wilcza do rzeki Kaczawy), pomimo że prace eksploatacyjne były tam prowadzone (fig. 2A).

Podczas przeprowadzonych badań terenowych możliwa była precyzyjna identyfikacja tylko niektórych form zapadliskowych i niecek położonych zwłaszcza w południowej części badań (fig. 3A, B). Wyznaczenie zasięgu i granic wszystkich form było możliwe dopiero dzięki analizom geomorfometrycznym. Zastosowanie wysokorozdzielczych numerycznych modeli terenu LiDAR było w tym przypadku szczególnie przydatne. Wartości przemieszczeń pionowych obszaru kopalni „Nowy Kościół” uzyskane dzięki tym analizom oscylują pomiędzy 0,79 a 2,43 m (tab. 1). Wartości te nieznacznie odbiegają od pomiarów wykonywanych przez dozór górniczy kopalni w latach 60. XX w. Maksymalna wartość przemieszczeń pionowych wyznaczona wówczas metodami geodezyjnymi wynosiła 2,187 m, przy miąższości eksploatacji sięgającej 2,4 m (Dychtowiec i in. 1966). Maksymalne wartości przemieszczeń uzyskane na podstawie modelu LiDAR z 2011 r. są zatem większe o ok. 25 cm. Należy jednak zaznaczyć, że wartość ta mieści się w maksymalnym błędzie wysokościowym dla danych wysokościowych LiDAR (Raport dostawy..., 2011). Pomimo tego faktu, zbieżność pomiarów geodezyjnych i geomorfometrycznych,

blisko 50 lat po zakończeniu pracy kopalni, wskazuje na wysoką przydatność numerycznych modeli wysokościowych LiDAR w określaniu wartości pionowych przemieszczeń na terenach podziemnej eksploatacji górniczej. Relacje właścicieli terenu o współcześnie powstających zapadliskach i obserwacje przeprowadzone na obszarze badań mogą wskazywać na współczesne ruchy pionowe na tym terenie.

**Podziękowania.** Autorzy pragną serdecznie podziękować prof. dr. hab. Markowi Granicznemu oraz anonimowemu Recenzentowi za cenne i wnikliwe uwagi, które pozwoliły na znaczne udoskonalenie pierwszej wersji pracy. Dziękujemy również dr. Cezaremu Bachowskiemu (KGHM Polska Miedź S.A.), dr. Wojciechowi Śliwińskiemu oraz dr. hab. Jurandowi Wojewodzie (Instytut Nauk Geologicznych Uniwersytetu Wrocławskiego) za merytoryczną dyskusję i uwagi dotyczące genezy opisanych form. Bardzo dziękujemy Marcinowi Maciejakowi za pomoc i konstruktywne uwagi w opracowaniu abstraktu i streszczenia w języku angielskim.

*Dane LiDAR zostały wykorzystane przez autorów na podstawie licencji DIO.DFT.DSI.7211.1619.2015\_PL\_N wydanej przez Głównego Geodetę Kraju dla Wydziału Nauk o Ziemi i Kształtowania Środowiska Uniwersytetu Wrocławskiego.*

## LITERATURA

- BALDO M., BIOCCHI C., CHIOCCHINI U., GIORDAN D., LOLLINO G., 2009 — LIDAR monitoring of mass wasting processes: The Radicofani landslide, Province of Siena, Central Italy. *Geomorphology*, **105**: 193–201.
- BŁAŻEJCZAK R., 1968 — Protokół zdawczo-odbiorczy z likwidacji ZG „Nowy Kościół”. Zał. nr 9. Szkody górnicze. Archiwum Państwowe we Wrocławiu – Oddział w Legnicy.
- BORECKI M., 1980 — Ochrona powierzchni przed szkodami górniczymi: praca zbiorowa (T. 1). Wydaw. Śląsk, Katowice.
- CHUDEK M., WILCZYŃSKI S., ŻYLIŃSKI R., 1979 — Podstawy Górniczości. Wydaw. Śląsk, Katowice.
- CYMERMAN Z., 2004 — Tectonic map of the Sudetes and the Fore-Sudetic Block (1 : 200 000). Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- DULIAS R., 2003 — Subsidence depressions in Upper Silesian Coal Basin. *Geomorfologický Sborník*, **2**: 11–16.
- DYCHTOWICZ Z., SKOWRONEK H., SŁOWIK H., 1966 — Wpływ eksploatacji rud miedzi na odkształcenie powierzchni na przykładzie kopalń Lena, Konrad i Nowy Kościół. II Krajowy Zjazd Górniczości Rud, Część 1: 144–181. Lubin.
- ENGELKEMEIR R.M., KHAN S.D., 2008 — Lidar mapping of faults in Houston, Texas, USA. *Geosphere*, **4**, 1: 170–182.
- FECHNER H., 1903 — Geschichte des schlesischen Berg und Hüttenwesens in der Zeit Friedrichs der Grossen, Friedrich Wilhelm's II und Friedrich Wilhelm's III, 1741 bis 1806, *Zeitschrift für des Berg-, Hütten- und Salinenwesen im Preussischen Staate*, **1**: 3.
- FRĄCKIEWICZ W., 1955 — Szczegółowa Mapa Geologiczna Sudetów w skali 1 : 25 000, ark. Świerzawa. Instytut Geologiczny, Warszawa.
- GŁOWACKI T., 2009 — Opracowanie prognozy przemieszczeń pionowych terenu górniczego ZG „Konrad” w Iwinach. *Pr. Nauk. Inst. Gór. P. Wroc.*, **128**, 36: 33–42.
- GUNIA T., MILEWICZ J., 1962 — Wykształcenie facjalne cechsztynu niecki północnosudeckiej. *Biul. Inst. Geol.*, **173**: 117–128.
- JERZMAŃSKI J., 1955 — Szczegółowa Mapa Geologiczna Sudetów w skali 1 : 25 000, ark. Złotoryja. Instytut Geologiczny, Warszawa.
- KACZMAREK W., ROŻEK R., 2008 — Historia poszukiwań i rozpoznania złóż rud miedzi w Starym Zagłębiu Miedziowym. Dzieje Górniczości – Element Europejskiego Dziedzictwa Kultury (red. P. Zagożdżon): 97–104. Wrocław.
- KASZOWSKA O., 2007 — Wpływ podziemnej eksploatacji górniczej na powierzchnię terenu. *Problemy Ekologii*, **11**: 52–57.
- KONDRACKI J., 2002 — Geografia regionalna Polski. PWN, Warszawa.
- MACHOŃ T., 1967 — Litostratygrafia i okruszcowanie dolnego cechsztynu w rejonie kopalni „Nowy Kościół”. *Prz. Geol.*, **15**, 7: 327–329.
- MACIEJAK K., MACIEJAK K., 2016 — Nieznany ośrodek dawnego górnictwa rud miedzi pod Nowym Kościołem i Sokółcem na Pogórzu Kaczawskim. *W: Materiały I. Warsztatów Dziedzictwo i historia górnictwa, Złoty Stok, 14–15.04.2016*: 34–41, Wrocław.

- MAZUREK K., 2014 — Wpływ eksploatacji węgla kamiennego na ukształtowanie powierzchni wybranych fragmentów miasta Ruda Śląska w latach 1975–2011. *Acta Geogr. Silesiana*, **15**: 13–30.
- MIGOŃ P., KASPRZAK M., TRACZYK A., 2013 — How high-resolution DEM based on airborne LiDAR helped to reinterpret landforms — examples from the Sudetes, SW Poland. *Landform Analysis*, **22**: 89–101.
- MILEWICZ J., JERZMAŃSKI J., 1955 — Szczegółowa Mapa Geologiczna Sudetów w skali 1 : 25 000, ark. Pielgrzymka. Instytut Geologiczny, Warszawa.
- MILEWICZ J., 1981 — Uwagi do podziału cyklicznego cechsztynu w synklinorium północnosudeckim. *Kwart. Geol.*, **25**, 1: 67–73.
- MILEWICZ J., 1985 — Propozycja formalnego podziału stratygraficznego utworów wypełniających depresję północnosudecką. *Prz. Geol.*, **33**, 7: 385–389.
- MILEWICZ J., KOZDRÓJ W., 1991 — Szczegółowa Mapa Geologiczna Sudetów w skali 1: 25 000, ark. Proboszczów. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- NIŚKIEWICZ J., 1967 — Podział cechsztynu w rejonie Nowego Kościoła. *Prz. Geol.*, **15**, 6: 268–272.
- PERYT T.M., 1978 — Zarys stratygrafii cechsztynu niecki północnosudeckiej. *Kwart. Geol.*, **22**, 1: 59–82.
- PLAN LIKWIDACJI kopalni „Nowy Kościół” — część opisowa. Teczka nr 0031. Archiwum Państwowe we Wrocławiu — Oddział w Legnicy.
- PROJEKT wstępny Zakładów Górniczych „Nowy Kościół” w Nowym Kościele, Biuro Projektów Przemysłu Metali Nieżelaznych „BIPROMET”, Katowice, maj 1952. Archiwum Państwowe we Wrocławiu — Oddział w Legnicy.
- RACZYŃSKI P., 1997 — Warunki sedymentacji osadów cechsztynu w niecce północnosudeckiej. *Prz. Geol.*, **45**, 7: 693–699.
- RAPORT dostawy ISOK — Informatyczny System Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami. Część Nr 3. Etap Nr 03, 2011–09–12.
- SKOWRONEK C., 1967 — Zagadnienie środkowego cechsztynu w rejonie Leszczyna–Wilków na Dolnym Śląsku. *Prz. Geol.*, **15**, 7: 330–332.
- SOKOŁA-SZEWIOLA V., 2011 — Przebieg zaobserwowanych przemieszczeń pionowych terenu górniczego w czasookresie związanym z wystąpieniem wstrząsu indukowanego eksploatacją ścianową. *Górnictwo i Geologia*, **6**: 157–168.
- SZPETKOWSKI S., 1978 — Pomiar deformacji na terenach górniczych. Wydaw. Śląsk, Kraków.
- STAROŃ T., 1995 — Górnictwo ogólne. Wydaw. Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin.
- ŚLIWIŃSKI, W., RACZYŃSKI, P., WOJEWODA, J., 2003 — Sedymentacja utworów epiwaryscyjskiej pokrywy osadowej w basenie północnosudeckim. *W: Sudety Zachodnie: od wendy do czwartorzędu* (red. A. Ciężkowski, i in.): 119–126. Polskie Towarzystwo Geologiczne, WIND, Wrocław.
- WEBSTER T.L., MURPHY J.B., GOSSE J.C., SPOONER I., 2006 — The application of lidar-derived digital elevation model analysis to geological mapping: an example from the Fundy Basin, Nova Scotia, Canada. *Can. J. Remote Sensing*, **32**, 2: 173–193.
- WOJCIECHOWSKI T., 2007 — Osiadanie powierzchni terenu pod wpływem eksploatacji węgla kamiennego na przykładzie rejonu miasta Knuruwa. *Prz. Geol.*, **55**, 7: 589–594.
- WOJEWODA J., BIAŁEK D., BUCHA M., GŁUSZYŃSKI A., GOTOWAŁA R., KRAWCZEWSKI J., SCHUTTY B., 2011 — Geologia Parku Narodowego Gór Stołowych – wybrane zagadnienia. *W: Geologiczne Warunki Środowiska Przyrodniczego Parku Narodowego Gór Stołowych*: 53–96. WIND, Wrocław.
- WÓJCIK A., WĘŻYK P., WOJCIECHOWSKI T., PERSKI, Z., MACZUGA S., 2013 — Geologiczna i geomorfologiczna interpretacja danych z lotniczego skaningu laserowego (ALS) rejonu Kasprowego Wierchu (Tatry). *Prz. Geol.*, **61**, 4: 234–242.
- WUTKE K., 1900 — *Codex Diplomaticus Silesiae*, **20**: 153.

## SUMMARY

Large-scale surface deformation related to deep mining activities is a well-researched phenomenon and have been thoroughly described in the literature (e.g. Borecki, 1980; Dulias, 2003; Kaszowska, 2007; Mazurek, 2014). Currently, the main methods applied to measure surface mining damages are geodetic methods based on GPS.

This paper provides an attempt of applying the geomorphometric analysis based on LiDAR DEMs to mining-related ground deformation. We describe deformation in the “Nowy Kościół” Copper Mine area in the Kaczawskie Foothills. Morphological parameters of subsidence forms have been determined and ground surface models have been developed to compile differential maps, enabling an estimation of vertical displacements in the mining area. Vertical displacement values estimated by geomorphometric methods have been compared with the results of geodetic surveying carried out in the 1960s when the mine was in operation (Dychtowiec *et al.*, 1966). Vertical displacement values for the “Nowy Kościół” mine obtained

through the geomorphometric analysis oscillate between 0.79 and 2.43 m and only lightly vary from the measurements taken by the mining supervision service during the 1960s. The maximum vertical displacement value measured using geodetic methods was 2.187 m, at the excavation thickness of up to 2.4 m (Dychtowiec *et al.*, 1966). The maximum displacement values obtained through the LiDAR DTM 2011 data sample analysis exceed those values by ca 25 cm. However, it should be noted that such a value is within the average altimetric error parameter for LiDAR data (Raport dostawy..., 2011). Nonetheless, the convergence of geodetic and geomorphometric measurements, almost 50 years after the cessation of mining operations, indicates a high viability of LiDAR DEMs to determine vertical displacement values for areas affected by underground mining operation. Accounts of contemporary emergence of sinkholes reported by land owners and author’s observations may indicate contemporary vertical movements in the area study.