

Możliwości zastosowania zdalnego systemu monitoringu wglębnego i powierzchniowego osuwisk w kopalni odkrywkowej węgla brunatnego na podstawie badań wykonanych w KWB Belchatów w ramach projektu UE RFCS Slopes

Zbigniew Bednarczyk¹



Possibilities of implementation of remote *in situ* and surface displacement landslide monitoring in lignite opencast mine based on the research conducted within the EU RFCS Slopes project. Prz. Geol., 69: 785–799; doi: 10.7306/2021.41

Abstract. Landslides in Polish opencast lignite mines are a serious problem for the efficiency of exploitation. They can also pose a threat to adjacent areas and the environment, and in some cases even jeopardize the continuity of lignite supplies to power plants. Such phenomena are associated with a number of factors, the most important of which are the geological engineering structure, groundwater conditions, unfavourable strength parameters of clayey soils and their usually relatively steep slopes. Counteracting such a phenomena, caused by mining activity, is usually difficult because of large size of landslides and the depth of exploitation reaching in some cases over

300 m. The paper presents the first application of on-line monitoring in a Polish opencast lignite mine. Performed in the Belchatów Mine, *in situ* monitoring was complemented by satellite radar interferometry (PSI), LiDAR airborne laser scanning, and terrestrial laser scanning. Research within the RFCS EU SLOPES project “Smarter Lignite Open Pit Engineering Solutions” was performed by an international consortium from six European countries. In Poland, the research was located mainly on the western slope of the Belchatów Field. In this area, in the Polish open pit lignite mine, on-line inclinometer, and a pore pressure monitoring system were the first located at the levels of +42 : –58 m a.s.l. Geological engineering investigations included 100 m depth core drilling, index laboratory tests, IL oedometer tests, CIU, CID triaxial tests, and numerical modelling. The total amount of *in situ* displacement, during the period December 2016–July 2019, reached 290 mm. The largest displacements up to 250 mm were recorded: to a depth of 45 m in the direction of slope inclination, and smaller ones up to 50 mm to a depth of 72.5 m. The displacements were accompanied by a decrease in pore pressure values by more than 200 kPa. In other parts of the mine and adjacent areas, the satellite radar interferometry detected displacements up to 60 mm/year on the outer slopes of the Szczerców dump. It also allowed identification of the landslide hazard in other areas. Data obtained from *in-situ* monitoring and laboratory tests on the western slope of the Belchatów Field were included in numerical modelling using the shear strength reduction method and the limit equilibrium method. This should allow helping for better recognition and warning of the existing hazards in the investigated area.

Keywords: geological engineering monitoring, slope stability, opencast lignite mine

W kopalniach odkrywkowych węgla brunatnego osuwiska są często związane z działalnością górniczą. Ze względu na duże rozmiary i głębokość wyrobisk odkrywkowych stwarzają one szereg zagrożeń. Jednym z nich jest konieczność składowania bardzo dużych mas nadkładu na zwałowiskach zewnętrznych i wewnętrznych. Sprawia to, że ryzyko osuwiskowe wzrasta. Osuwiska mogą powodować zagrożenie dla efektywności eksploatacji oraz negatywnie oddziaływać na środowisko (Bednarczyk, Nowak, 2010; Bednarczyk, 2017a). Na wielkość zagrożenia osuwiskowego ma wpływ budowa geologiczna, parametry wytrzymałościowe gruntów, zagospodarowanie terenu, opady atmosferyczne, zmiany poziomu wód gruntowych wywołane odwadnianiem, częściowa saturacja gruntów, stosowanie materiałów wybuchowych, sejsmiczność naturalna, procesy krasowe, infiltracja wód i sufozja. Skala potencjalnych szkód może być duża, często mierzona w milionach metrów sześciennych (Patrzyk, 1996; Rybicki, 1996; Czarniecki, Organiściak, 2015). Wpływ na to ma szereg czynników związanych w dużym stopniu ze złożonością budowy geologiczno-inżynierskiej tych złóż, wieloma różnorodnymi czynnikami wewnętrznymi i zewnętrznymi inicjującymi osuwiska oraz stosunkowo niewielką częstotliwością wykonywanych pomiarów i badań kontrolnych.

Przeciwdziałanie zwykle ogranicza się do zmian w projektach eksploatacyjnych, geometrii zbocza, usypaniu przypór zwiększających ich stateczność lub zwiększeniu efektywności odwodnienia. Dla lepszego poznania genezy tych procesów, ich zasięgu, dalszej aktywności oraz skutecznej remediacji szczególne znaczenie ma zastosowanie kompleksownych metod badawczych *in situ* i laboratoryjnych (Bednarczyk, Sandven 2004). Rozpoznanie ewentualnych zagrożeń wymaga szczegółowej znajomości budowy geologicznej i warunków geologiczno-inżynierskich. Dane te muszą być zidentyfikowane i scharakteryzowane jakościowo.

Kompleksowe rozpoznanie warunków geologicznych i hydrogeologicznych, takich jak np. rodzaj gruntów i skał występujących w otworach, oraz określenie reprezentatywnych parametrów, takich jak wytrzymałość na ścinanie, wielkość, głębokość i kierunek przemieszczeń gruntu, głębokość zwierciadła wód gruntowych, występujące ciśnienie porowe w gruncie, jest zazwyczaj bardzo złożone. Ma ono jednak podstawowe znaczenie dla określenia bezpieczeństwa odkrywek i zwałowisk nadkładu. Jest też ważne do określenia instrumentów, które powinny być uwzględnione w projekcie systemu monitoringu. Metody obserwacyjne mogą być wykorzystane do sprawdzenia wielkości zarejestrowanych przemieszczeń w trakcie eks-

¹ Poltegor-Instytut, Instytut Górnictwa Odkrywkowego, ul. Parkowa 25, 51-616 Wrocław; zbyszbed@gmail.com

ploatacji kopalni oraz zmian powierzchni terenu w stosunku do przewidywanych wcześniej na etapie projektowania.

W artykule przedstawiono wybrane metody monitoringu geotechnicznego oraz określono ich przydatność dla wczesnego ostrzegania o możliwych zagrożeniach. W ramach polskiej części projektu RFCS Slopes na zachodnim zboczu KWB Bełchatów zainstalowano pierwszy w Polsce system monitoringu wgłębnego on-line w odkrywkowym zakładzie górniczym. Wykonane prace obejmowały także monitoring powierzchniowy przemieszczeń z wykorzystaniem radarowej interferometrii satelitarnej w wysokiej rozdzielczości (PSI), skanowania lotniczego (UAV LiDAR), naziemnego (TLS) oraz modelowanie numeryczne.

METODY MONITORINGU I ANALIZ STATECZNOŚCI ZBOCZY

W polskich kopalniach węgla brunatnego od wielu lat są stosowane różnorodne metody monitoringu geotechnicznego. Opierają się one zarówno na metodach geodezyjnych, geofizycznych jak i geologiczno-inżynierskich. Oprócz standardowych naziemnych pomiarów geodezyjnych w ostatnich latach powszechnie stosowane są pomiary satelitarne i lotnicze z wykorzystaniem UAV oraz naziemne i lotnicze skanowanie radarowe. Metody geologiczno-inżynierskie, takie jak standardowe pomiary inklinometryczne oraz pomiary głębokości występowania poziomu wód gruntowych, mogą zostać rozbudowane o pomiary ciśnień porowych w gruncie, zaawansowane metody monitoringu przemieszczeń wgłębnych z wykorzystaniem czujników MASW 3D, magnetometrów, ekstensometrów, czujników naprężeń i temperatury gruntu. Nowoczesna instrumentacja monitoringowa umożliwia dostęp on-line do rejestrowanych danych oraz automatyczne generowanie alarmów przy przekroczeniu wartości progowych. Tego typu urządzenia stosowane na kopalniach odkrywkowych są w wielu krajach między innymi w USA, Australii, Kanadzie (Bednarczyk 2017b).

Wyniki monitoringu zastosowane w modelowaniu numerycznym mogą pomóc w przewidywaniu przyszłego zachowania osuwisk w odkrywkowych zakładach górniczych. Dotyczy to zarówno wprowadzenia do modelu lokalizacji wykrytej powierzchni poślizgu osuwiska, wielkości przemieszczeń, położenia zwierciadła wód gruntowych, jak i ciśnienia porowego.

Modelowanie stateczności zboczy umożliwiają metody oparte na teorii równowagi granicznej, badające zależności pomiędzy siłami sprzyjającymi przemieszczeniom wgłębnym i siłami im przeciwdziałającymi. Tego typu metody, poza wartością wskaźnika stateczności zbocza Fos , nie wskazują ryzyka związanego z danym scenariuszem (Nguyen, i Chowdhury 1984, Wu 2008). Współczynnik stateczności zbocza jest określany jako:

$$Fos = \frac{tg\varphi}{tg\varphi_f} = \frac{c}{c_f}$$

gdzie:

φ – kąt tarcia wewnętrznego materiału budującego zbocze [deg],

φ_f – kąt tarcia wewnętrznego materiału budującego zbocze, przy którym traci ono stateczność [deg],

c – spójność materiału budującego zbocze [MPa],

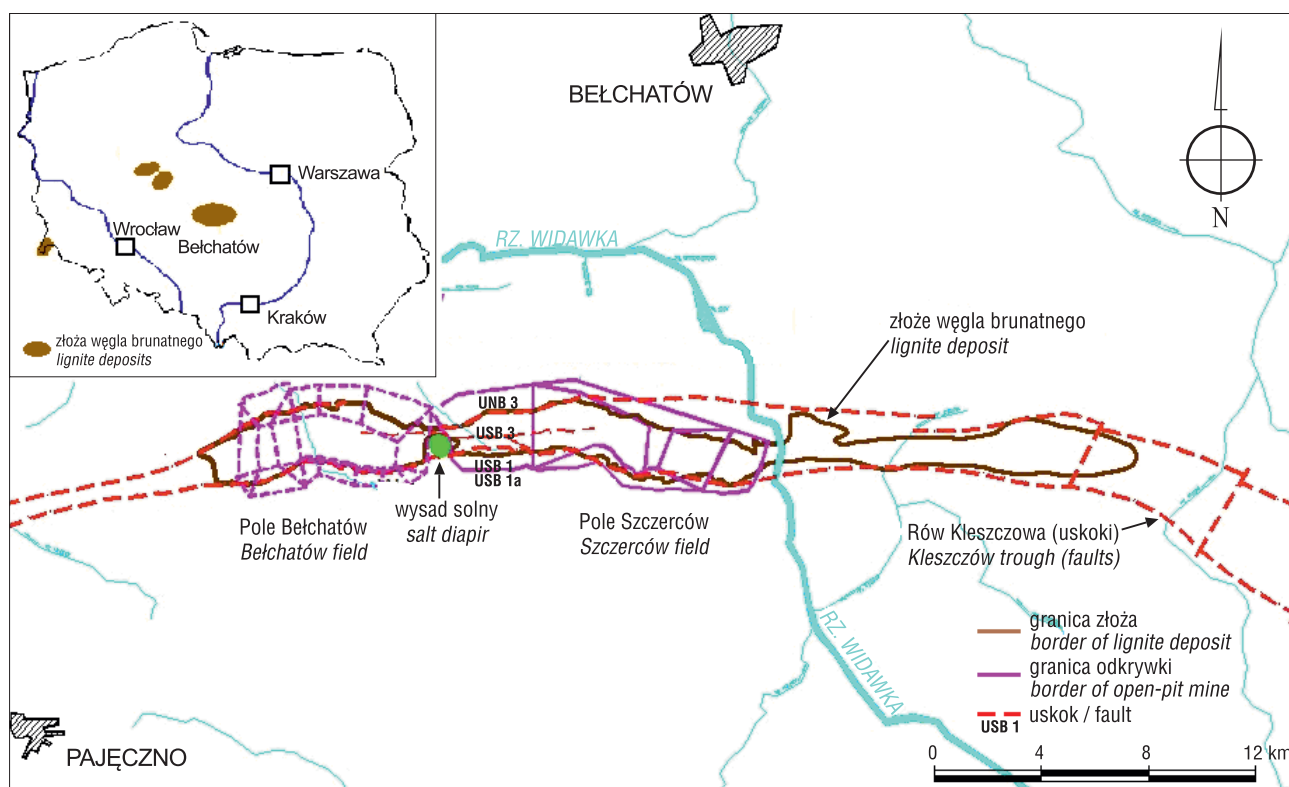
c_f – spójność materiału budującego zbocze, przy którym traci ono stateczność [MPa].

W analizach wykorzystujących metody analizy granicznej badanie ogranicza się do oceny stateczności i nie zawiera informacji o lokalnych warunkach, które doprowadziły do powstania osuwisk. Postęp w dziedzinie mechaniki gruntów i programów komputerowych umożliwił zastosowanie bardziej kompleksowych metod, np. opartych na teorii elementów skończonych FEM i teorii redukcji wytrzymałości na ścinanie SSR. Jednakże często najbardziej rozpowszechnione praktyki są oparte na podejściu deterministycznym. Niedogodnością podejścia konwencjonalnego jest fakt, że czynniki wpływające na globalne lub częściowe współczynniki stateczności oraz wyniki analiz nie w pełni wiarygodnie odzwierciedlają współczynnik stateczności Fos skarpy, jako całej struktury geotechnicznej (Baecher, Christian 2003; Ang, Tang, 2007). Według Whitmana (1984) współczynniki stateczności Fos wskazują jedynie na możliwość wystąpienia osuwiska. Może to być mylące przy określaniu rzeczywistego poziomu ryzyka. Lokalnie wysokie współczynniki stateczności Fos niekoniecznie odzwierciedlają niższy poziom ryzyka, ponieważ ich wyniki mogą być zanegowane przez inne wątpliwości, słabości w rozpoznaniu terenowym lub niewystarczającą liczbę analiz (Christian, Ladd, 1994). Niedogodności te mogą stanowić istotne ryzyko ekonomiczne przy projektowaniu odkrywek. Identyfikacja reprezentatywnych parametrów wytrzymałościowych oraz eliminacja błędów wpływających na niepewność przyjętych założeń projektowych jest bardzo ważna dla zachowania bezpieczeństwa geotechnicznego (Kulhawy, 1992; Phoon, Kulhawy, 1999). W Polsce są stosowane różnorodne metody modelowania stateczności zboczy jednak nie zawsze są one powiązane z wynikami monitoringu. W ostatnich latach obserwuje się tendencję do wdrażania metod projektowania przyjętych przez Eurokod 7, uwzględniających zmienność parametrów geotechnicznych (CEN, 1994).

CHARAKTERYSTYKA GEOLOGICZNA OBSZARU BADAŃ

Badania przeprowadzono w kopalni odkrywkowej KWB *Bełchatów*, która jest jednym z największych wyrobisk odkrywkowych w Europie, położonym 30 km na południowy wschód od Łodzi (ryc. 1). Wymiary kopalni to 12,5 km długości i 3 km szerokości. Aktualna głębokość wydobywania wynosi 310 m.

Złoże węgla brunatnego Bełchatów jest położone w obrębie rowu tektonicznego Kleszczowa, który powstał w podłożu górnokredowych i jurajskich wapieni oraz margli, jako wąska i głęboka struktura tektoniczna o kierunku W–E, wypełniona osadami neogeńskimi (ryc. 2a). Od strony południowej i północnej rów jest ograniczony dużymi uskokami brzeżnymi. Bloki mezozoiczne wewnątrz rowu są rozdzielone poprzecznymi uskokami. Kopalnia prowadzi wydobywanie węgla brunatnego na dwóch polach eksploatacyjnych, rozdzielonych wysadem solnym. Miąższość osadów neogeńskich w obrębie rowu przekracza 300 m i jest ok. 5–15 razy większa niż poza nią (Ciuk, Piwocki 1980). Główny pokład węgla brunatnego ma miąższość 20–60 m. Największe ilości węgla brunatnego znajdują się w głębokim rowie drugiego rzędu w pobliżu południowego stoku kopalni (ryc. 2b). Eksploatacja złoża Bełchatów zakończy się w ciągu kilku najbliższych lat, a złoża Szczerców



Ryc. 1. Lokalizacja KWB Belchatów
Fig. 1. The Belchatów Mine location

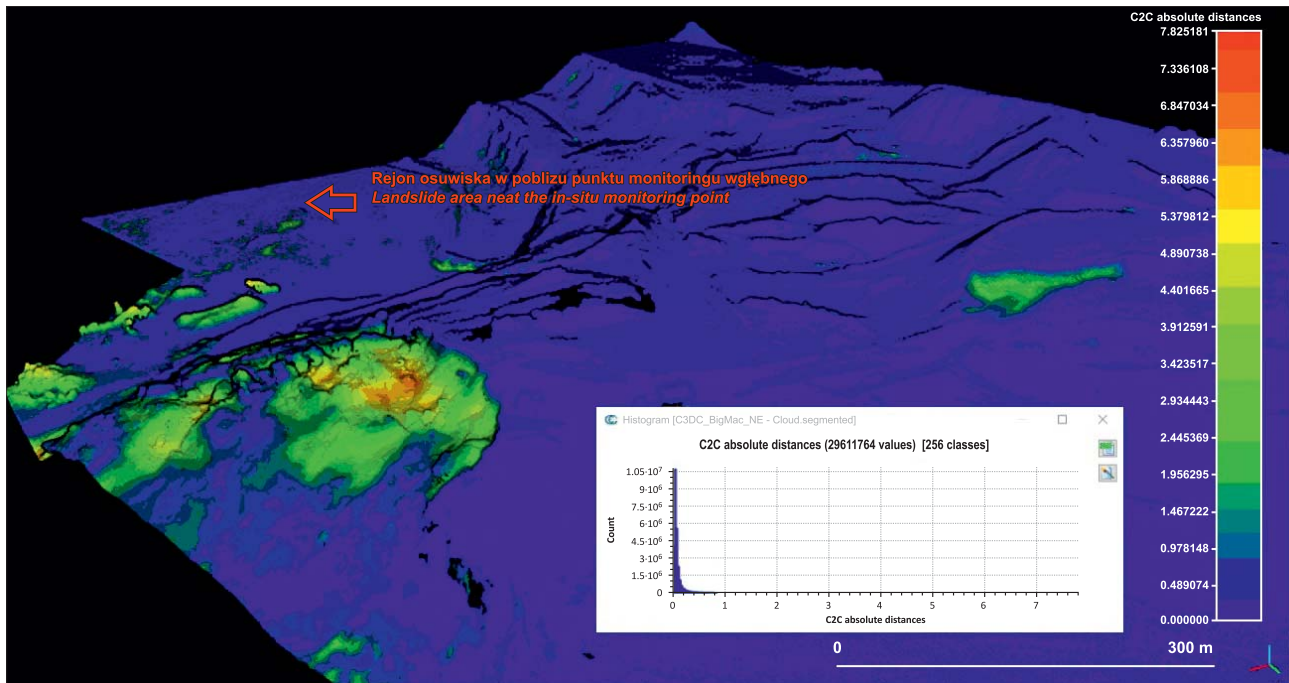
w 2038 r. Niskie parametry wytrzymałościowe gruntów ilastych nadkładu oraz złożona struktura tektoniczna o głębokości ponad 300 m powodują poważne zagrożenia dla stateczności zboczy. Corocznie odnotowuje się tu kilkaset małych i dużych osuwisk o objętości setek, a nawet kilku milionów metrów sześciennych (Patrzyk, 1996; Rybicki, 1996; Janecki i in., 1999; Jonczyk, Organiściak, 2010). W 2012 r. wykryto 32 strefy zagrożenia na zboczach. Ponad 85% osuwisk spowodowanych eksploatacją górniczą miało charakter strukturalny (Flisiak i in., 2014). Na wybranym do badań Polu Belchatów wystąpiło wiele groźnych osuwisk o objętości od kilku tysięcy do 3,5 mln m³, z przemieszczeniami od 2 mm do 2 m na dobę (Rybicki, 1996; Jonczyk, Organiściak, 2010; Czarnecki, Organiściak, 2015). Podatne na osuwiska powierzchnie strukturalne i paleosuwiskowe występują na południowym zboczu wyrobiska, w pobliżu głębokiej wtórnej struktury zapadliskowej o największej miąższości węgla brunatnego. Północne zbocze tej kopalni zbudowane z czwartorzędowych ilów zastoiskowych i warwowych o małej wytrzymałości stwarzało również liczne zagrożenia dla linii transportu taśmowego i infrastruktury energetycznej. Głównymi powierzchniami strukturalnymi narażonymi na osuwiska są granice osadów czwartorzędowych i neogeńskich, granice ilów neogeńskich oraz strop głównego pokładu węgla brunatnego. Innymi powierzchniami podatnymi na powstawanie osuwisk są uskoki, spękania, powierzchnie tektoniczne i glacitektoniczne, grunty o niskiej wytrzymałości oraz ily neogeńskie. Obserwuje się znaczną przewagę osuwisk strukturalnych, które są naturalną konsekwencją złożoności budowy geologicznej złoża węgla brunatnego i nadkładu. Największe osuwiska wystąpiły na południowym zboczu odkrywki, wzdłuż uskoków zlokalizowanych na tym zboczu. Występujący tam, uskok USB1 (ryc. 1, 2b) występuje na całej długości odkrywki, natomiast uskok

USB1a nie wszędzie jest wyraźny. Według Kossowskiego i innych (1992) USB1 jest wąską strefą uskokuwą, która stanowi górny koniec głębokiej, wklęsłej dyslokacji o przebiegu W–E, związanej z okresem waryscyjskim. Od północy złoże jest ograniczone uskokiem UNB3 o charakterze komplementarnym do wyżej wymienionych uskoków. W południowej części rowu Kleszczowa występuje struktura rowu drugiego rzędu. Jest to wąska i głęboka strefa ograniczona od południa uskokiem USB1 i USB1a, a od północy uskokiem USB2 (ryc. 2b). Struktura ta, o dużo większej głębokości, ma przebieg zgodny z głównym kierunkiem rowu Kleszczowa. Charakteryzuje się występowaniem osadów paleosuwiskowych, podatnych na aktywację przemieszczeń. W ostatnich latach, ze względu na dużą głębokość eksploatacji węgla brunatnego oraz sąsiadującą strukturę wysadu solnego, również zbocze zachodnie Pola Belchatów zostało objęte ruchami osuwiskowymi. Na tym zboczu odnotowano osiem stref zagrożenia osuwiskowych z aktywnymi lub spodziewanymi przemieszczeniami. Zbocze to zostało wybrane do badań prowadzonych w ramach polskiej części projektu EU RFCS Slopes, których wyniki przedstawiono w niniejszym artykule.

METODY I WYNIKI MONITORINGU

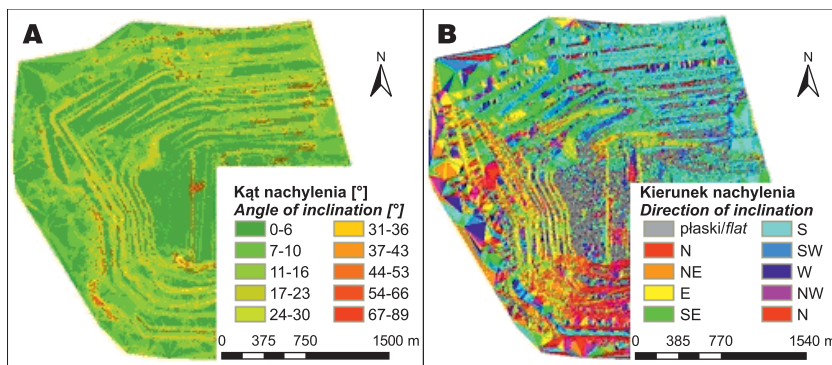
LiDAR

Metodyka. W projekcie Slopes do budowy numerycznego modelu terenu w KWB Belchatów wykorzystano pomiary LiDAR UAV przy użyciu skanera YellowScan (ryc. 3). Pomiary przeprowadzono w październiku i listopadzie 2016 r. Do analizy przemieszczeń na zboczu zachodnim wykorzystano także lotnicze pomiary LiDAR z marca 2017 r. Po zakończeniu skanowania dane ze skanera zostały zczytane do programu analizującego wyniki badań, gdzie



Ryc. 3. Porównanie pomiarów LiDAR UAV z fotogrametrią lotniczą, przemieszczenia po trzech miesiącach (listopad 2016–marzec 2017) część północna zbocza zachodniego Pola Belchatów, Ineris (Francja). Źródło: Slopes project report (Marshall i in., 2019)

Fig. 3. Comparison of LiDAR UAV measurements with aerial photogrammetry, displacement after three months (November 2016–March 2017) north part of west slope in Belchatów Field, Ineris (France). Source: Slopes project report (Marshall et al., 2019)



Ryc. 4. Interpretacja kąta nachylenia (A) i kierunku nachylenia (B) zbocza zachodniego Pola Belchatów na podstawie skaningu laserowego TLS, University of Exeter (UK). Źródło: Slopes project report (Marshall i in., 2019)

Fig. 4. Interpretation of angle of inclination (A) and direction of inclination at west slope (B) of the Belchatów Field based on TLS laser scanning, University of Exeter (UK). Source: Slopes project report (Marshall et al., 2019)

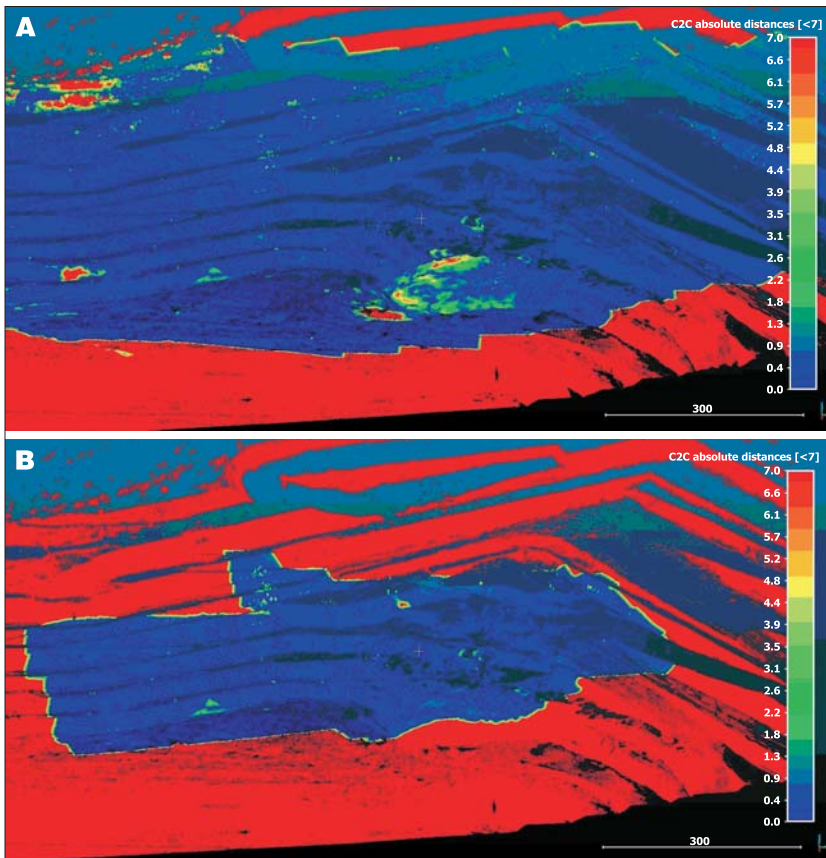
wyraźnie widać czerwone i zielone strefy reprezentujące największe przemieszczenia na niebieskim tle reprezentującym obszary stabilne.

Satelitarna Interferometria Radarowa (PSI)

Metodyka. Satelitarnie skanowanie radarowe w wysokiej rozdzielczości PSI (*Persistent Scatterer Interferometry*) z satelitów Cosmo SkyMed (dokładność 5–10 mm) zostało zamówione przez Poltegor-Institut i wykonane przez GAP Geophysical Applications Processing s.r.l. (GAP Spółka zależna Politechniki Bari, Włochy). Technika zastosowana do tego uzupełniającego monitoringu opierała się na interferometrii SAR (*Synthetic Aperture Radar*) z wykorzystaniem satelity COSMO-SkyMed, z użyciem oprogramowania SPINUA (*Stable Points Identification in Non-Urbanized Area*). Jest to program przetwarzania obrazu interferome-

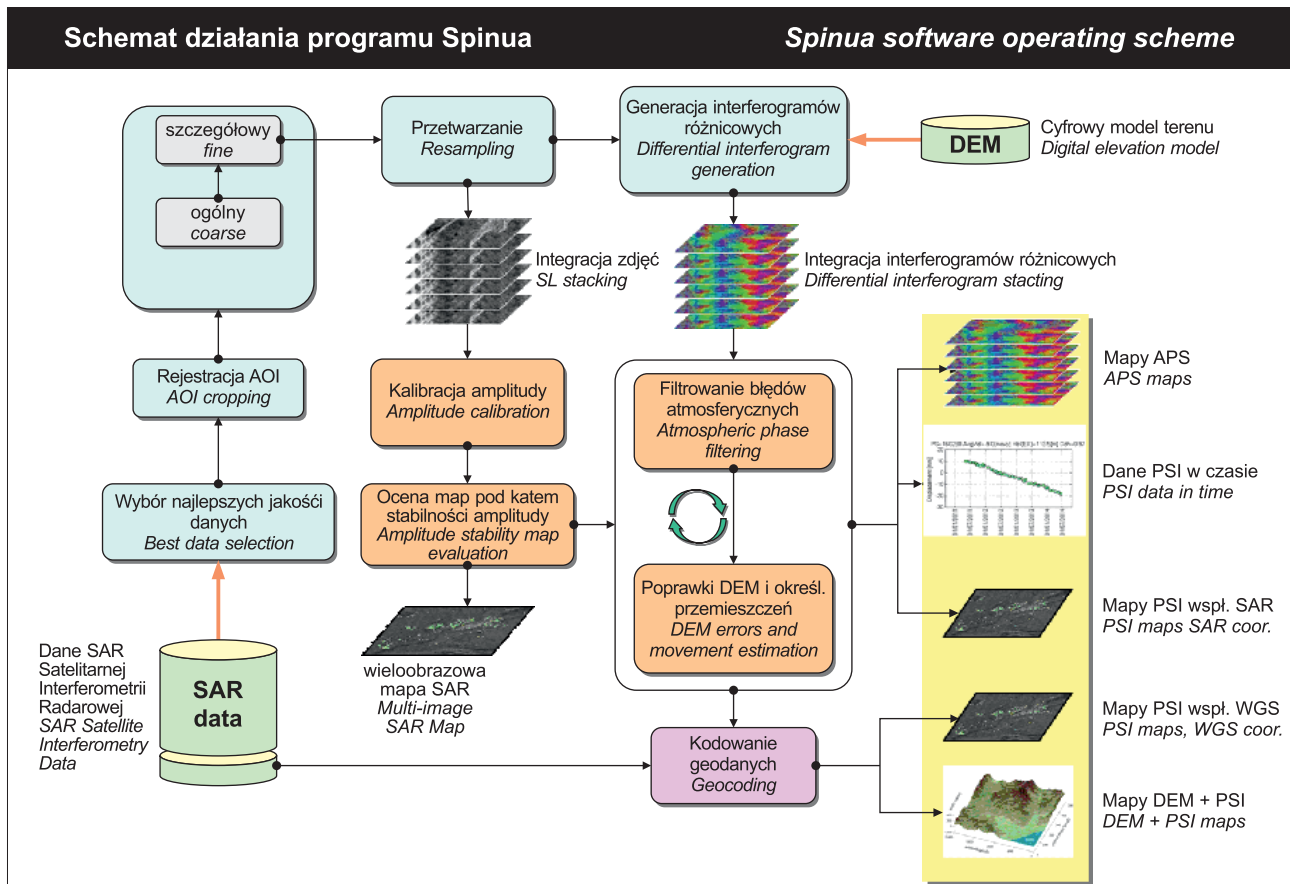
trycznego SAR dla monitorowania przemieszczeń gruntu (ryc. 6). Oprogramowanie to pozwala na systematyczne przetwarzanie wszystkich zarchiwizowanych danych z danego obszaru, poprzez tworzenie interferogramów różnicowych, które analizują obraz główny w funkcji czasu i przestrzeni. Techniki PSI omijają problem korelacji geometrycznej i czasowej poprzez uwzględnienie czasowo koherentnych rozpraszaczy. Ponadto, dzięki wykorzystaniu dużej ilości danych, sygnał jest szacowany i korygowany. Program umożliwia wykorzystanie wszystkich pozyskanych obrazów (niezależnie od linii bazowej) oraz estymację parametrów dla interferogramów o niskiej spójności przestrzennej.

Satelita COSMO-SkyMed (*Constellation of Small Satellites for Mediterranean Basin Observation*) jest największym włoskim satelitą kosmicznym. System składa się z czterech średniej wielkości satelitów umieszczonych na niskiej orbicie okołoziemskiej. Każdy satelita jest wyposażony w wielomoduły radar SAR, o wysokiej rozdzielczości, pracującym w paśmie X, rozmieszczonym w sposób rozłożony w czasie. Dziesięciokrotne zwiększenie rozdzielczości zasięgu naziemnego (w odniesieniu do danych ERS/ENVISAT/Sentinel-1) oraz krótszy cykl powtarzania orbity (16 dni dla pojedynczego satelity konstelacji COSMO-SkyMed, 4 dni dla całej konstelacji COSMO-SkyMed w stosunku do 35 dni dla ERS/ENVISAT) przyczyniło się poprawy możliwości monitorowania poprzez instrumenty teledetekcji. Badania dotyczyły całego terenu KWB *Belchatów*, w tym badanego rejonu zbocza zachodniego Pola Belchatów oraz rejonów przyległych. Analizowany obszar objęty skanowaniem miał wymiary ok. 30 × 30 km. Skano-

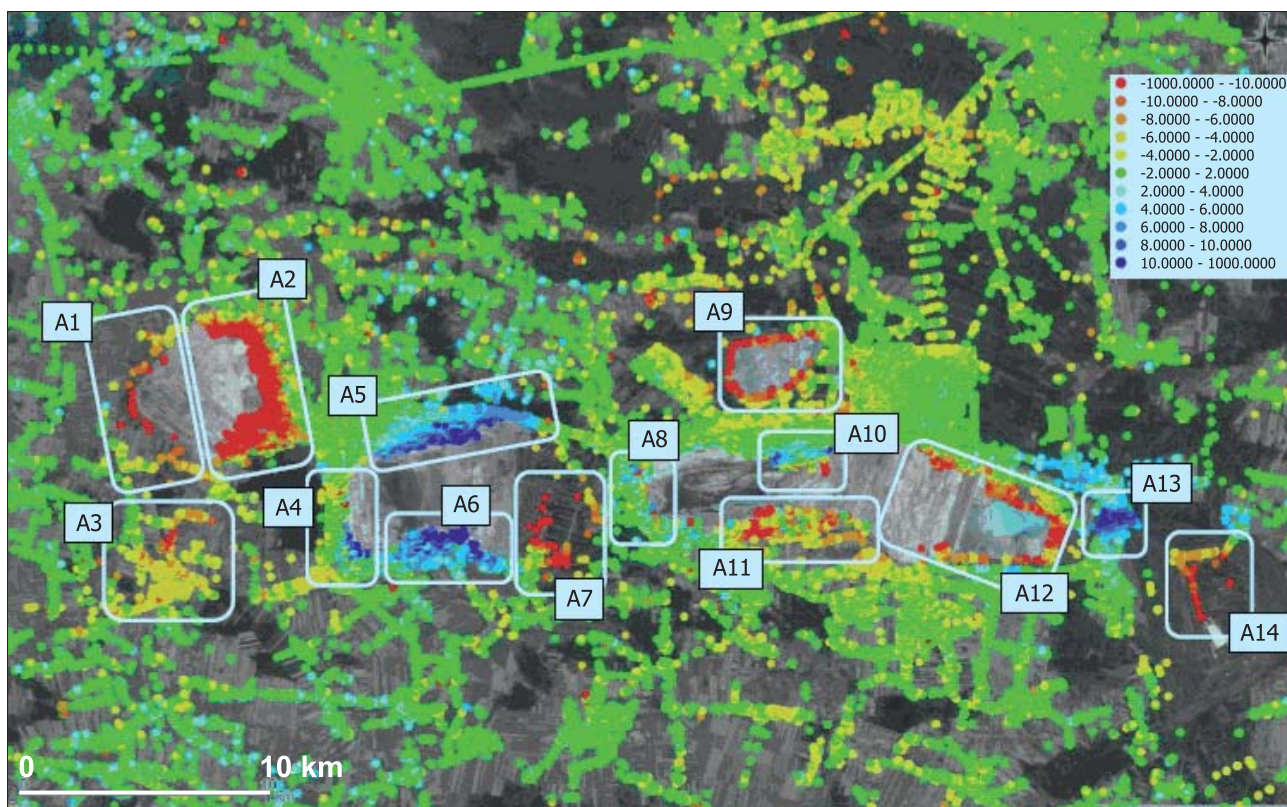


Ryc. 5. Porównanie fotogrametrii lotniczej z pomiarami LiDAR UAV przemieszczenia po trzech miesiącach listopad 2016–marzec 2017 (A) i wynikami naziemnego skaningu laserowego TLS czerwiec 2016–marzec 2017 (B), zachodnie zbocze pola Bełchatów część północna, Ineris (Francja). Źródło: Slopes project report (Marshall i in., 2019)

Fig. 5. Comparison of aerial photogrammetry with LiDAR UAV measurements, displacement after three months November 2016–March 2017 (A) and aerial TLS scanning June 2016–March 2017 (B), north part of west slope in Bełchatów Field, Ineris (France). Source: Slopes project report (Marshall et al., 2019)



Ryc. 6. Schemat blokowy oprogramowania Spinua
Fig. 6. Flow chart of Spinua software



Rys. 7. Wyniki interferometriami satelitarnej Persistent Scatter Interferometry (PSI). Pola A1–A14 – rejon zagrożenia (przemieszczeń); A1–A3 – zwałowisko zewn. Pola Szczerców; A4–A7 – Pole Szczerców; A8 – wysad solny Dębiny; A8, A10–A11 – Pole Bełchatów; A9 – osadnik popiołów z elektrowni; A12 – zwałowisko wewnętrzne Pola Bełchatów; A13 – składowisko popiołów z elektrowni; A14 – zwałowisko zewnętrzne Pola Bełchatów; wielkości przemieszczeń (–) maks. osiadania – kolor czerwony, maks. wypiętrzenia kolor ciemnoniebieski, legenda w prawym górnym rogu rysunku [mm]

Fig. 7. Results of Persistent Scatter Interferometry (PSI). Fields A1–A14 – risk areas (displacements); A1–A3 – external spoil dump of Szczerców Field; A4–A7 Szczerców Field; A8 Dębina Salt Dome; A8, A10–A11 Bełchatów Field; A9 – settling ash power plant tank; A12 – internal spoil dump of Bełchatów Field; A13 – power plant ash dump; A14 – external dump of Bełchatów Field; displacement values (–) max. subsidence – red color, max. uplift – dark blue color, legend in the upper right corner of the drawing [mm]

wanie SAR COSMO-SkyMed wykonywano w trybie STRIPMAP, uzyskując obrazowanie o średniej rozdzielczości, z dwoma radarami w geometrii wznoszącej o rozdzielczości przestrzennej 3 m.

Wyniki. Wstępne wyniki PSI składają się z mapy przemieszczeń powierzchniowych, która zawiera jedynie zidentyfikowaną ich średnią prędkość (ryc. 7). Pomimo tego że wstępna obróbka bazowała na ograniczonej liczbie punktów, to udało się znaleźć 100 tys. wiarygodnych punktów pomiarowych na terenie KWB Bełchatów i w jej pobliżu (obszar ok. 1600 km²), dzięki którym możliwe było określenie prędkości przemieszczeń powierzchniowych. Prędkości przemieszczeń są obliczone w stosunku do pozycji satelity: wartości dodatnie (punkty niebieskie) odpowiadają punktom poruszającym się w kierunku satelity, natomiast wartości ujemne (punkty czerwone) odpowiadają punktom oddalającym się od satelity. Punkty poruszające się ortogonalnie do linii wzroku są „widziane” przez satelitę jako punkty nieruchome. Szczegółowy widok badanego rejonu KWB Bełchatów przedstawiono w postaci mapy, na której dla lepszego zobrazowania przemieszczeń zastosowano różne kolory (ryc. 7). Można zauważyć, że największe osiadania (kolor czerwony) wystąpiły na zewnętrznym zwałowisku nadkładu Pola Szczerców, na wewnętrznym zwałowisku nadkładu Pola Bełchatów oraz na wewnętrznym składowisku popiołów z elektrowni. Największe wypiętrzenia, prawdopodobne

zmiany morfologii zbocza (kolor niebieski) związane z ruchami osuwiskowymi, wystąpiły na północnym i południowym zboczu Pola Bełchatów. Używając zdefiniowanej skali do 50 mm rocznie, można wnioskować, że największe osiadania (kolor czerwony) wystąpiły na zewnętrznym zwałowisku Pola Szczerców i górnej części zwałowiska wewnętrznego Pola Bełchatów. Natomiast przy skali do 100 mm rocznie obszary te (czerwone punkty) ograniczały się do zewnętrznego zwałowiska Pola Szczerców.

Wykorzystując zdjęcia satelitarne CosmoSkyMed, dla całego obszaru KWB Bełchatów i obszarów przyległych zidentyfikowano 781 206 punktów, dla których określono przemieszczenia powierzchniowe. Łącznie zidentyfikowano czternaście stref przemieszczeń w obrębie zewnętrznego zwałowiska nadkładu Pola Szczerców oraz w kilku innych rejonach, w tym na zboczach odkrywek Pola Bełchatowa i Szczercowa. Największe osiadania, dochodzące do 60 mm/rok, stwierdzono na wschodnim zboczu zewnętrznego zwałowiska nadkładu Pola Szczerców. Na zachodnim zboczu tego zwałowiska osiadania wynosiły 30–40 mm/rok. W rejonie południowego zbocza Pola Bełchatów przemieszczenia (punkty porównywalne) wynosiły 19–24 mm/rok.

Na zboczu zachodnim przemieszczenia powierzchniowe stwierdzone metodą satelitarną wynosiły do 10 mm/rok i były znacząco mniejsze niż wyniki wgłębnego monitoringu inklinometrycznego, wynoszące ok. 100 mm/rok do

Tab. 1. Wyniki badań trójosiowych
Table 1. Results of triaxial tests

| Lp. No. | Głębokość Depth [m] | Typ gruntu Soil type | Rodzaj testu Test type | Parametry wytrzymałościowe Strength parameters | | | |
|------------|---------------------------|--|---------------------------|---|---------------|----------------------|----------|
| | | | | Kąt tarcia wewnętrznego Friction angle | | Spójność Cohesion | |
| | | | | ϕ [deg] | ϕ' [deg] | c [kPa] | c' [kPa] |
| 1 | 4,0 | piasek gliniasty loamy sand | CIU | 42,9 | 42,9 | 0,0 | 0,0 |
| 2 | 16,4 | pył piaszczysty sandy silt | CIU | 33,5 | 34,1 | 27,8 | 19,7 |
| 3 | 29,3 | glina z dom. węgla brunat. clay with an admixture of brown coal | CIU | 11,4 | 14,5 | 66,3 | 103,2 |
| 4 | 33,0 | ił pylasty silty clay | CIU | 21,8 | 30,3 | 129,2 | 32,5 |
| 5 | 33,5 | węgiel brunatny brown coal | CID | | 19,0 | | 200,0 |
| 6 | 46,4 | ił clay | CIU | 8,5 | 9,8 | 6,3 | 18,7 |
| 7 | 47,5 | piasek gliniasty loamy sand | CIU | 25,1 | 28,6 | 0,0 | 0,0 |
| 8 | 50,5 | ił clay | CIU | 12,9 | 15,5 | 373,0 | 345,1 |
| 9 | 57,5 | piasek gliniasty loamy sand | CIU | 29,1 | 28,4 | 0,0 | 0,0 |
| 10 | 81,0 | pył piaszczysty sandy silt | CIU | 35,3 | 34,9 | 32,3 | 41,2 |
| 11 | 81,5 | pył piaszczysty sandy silt | CIU | 32,3 | 32,4 | 154,9 | 153,6 |

głęb. 40 m (w zakresie +42/–2 m n.p.m.). Prawdopodobnie było to spowodowane faktem, że satelita poruszał się w tym samym kierunku, co występujące przemieszczenia (z zachodu na wschód). Wydaje się, że takim przypadkiem celowe by było umieszczenie specjalnych reflektorów zlokalizowanych w rejonie punktu pomiarów inklinometrycznych, które umożliwiłyby lepszą widoczność przemieszczeń powierzchni terenu przez satelitę. Należy także zaznaczyć, że wyniki monitoringu powierzchniowego nie zawsze są zgodne z wielkościami przemieszczeń wgłębnymi występujących na dużych głębokościach i reprezentujących zmienne wartości przemieszczeń.

Zaletą pomiarów satelitarnych PSI było to, że umożliwiły one analizę przemieszczeń na dużym obszarze obejmującym cały zakład górniczy i tereny do niego przyległe. Należy zaznaczyć, że metoda ta pozwala na badanie przemieszczeń inicjujących większe osuwiska i ich dalszy rozwój. Ma jednak również ograniczenia związane z miejscami, gdzie morfologia zmienia się bardzo szybko i nie pozwala na porównywanie tych samych elementów terenu. W takich przypadkach przemieszczenia mogą wynosić np. do 1000 mm/ dobę, dla nowo składowanych gruntów na zwałowiskach nadkładu (wtedy brak jest danych satelitarnych). Podobną sytuację z brakiem danych można zaobserwować na bardzo aktywnych osuwiskach o dużych przemieszczeniach, szybko zmieniających swoją morfologię (np. osuwisko na południowym zboczu Pola Bełchatów). W takich przypadkach pomocne w pomiarach mogłyby być reflektory zainstalowane na stałe na powierzchni zboczy w zagrożonych rejonach.

Badania laboratoryjne

Metodyka. Zainstalowanie systemu monitoringu wymagało wykonania wierceń rdzeniowych, pobrania próbek

oraz szczegółowego opisu geologiczno-inżynierskiego rodzajów gruntów, ich wilgotności, konsystencji oraz wstępnych, terenowych badań ich parametrów wytrzymałościowych.

Do rozpoznania podstawowych parametrów fizycznych i wytrzymałościowych gruntów pobrano 31 próbek NNS o średnicy 90 mm i długości 500–700 mm. Wstępną identyfikację parametrów wytrzymałościowych przeprowadzono na podstawie 36 połowych badań penetrometrem wciskowym i ścinarką obrotową. Badania wytrzymałości na ścinanie wykonane na próbkach gruntu z otworu wiertniczego wykazały spójność (Cu) 24–44,7 kPa oraz wytrzymałość na ścinanie 23,9–47,8 kPa. Najniższe wartości parametrów wytrzymałościowych stwierdzono dla iłów na głębokości 54 m, a najwyższe w glinach z węglem brunatnym na głębokości 29,5 m. Program badań laboratoryjnych obejmował badania podstawowych parametrów fizycznych gruntów, badanie w aparacie bezpośredniego ścinania, badania edometryczne, trójosiowe CIU oraz CID. Badania podstawowych parametrów fizycznych gruntów obejmowały analizę uziarnienia, wilgotności, gęstość objętościową, gęstość objętościową szkieletu gruntowego w stanie suchym i nasyconym wodą. Badania obejmowały również zawartość części organicznych oraz granice płynności i plastyczności.

Testy trójosiowe wykonano na 31 próbkach gruntu pobranych z otworu wiertniczego dla rozpoznania budowy geologiczno-inżynierskiej i instalacji monitoringu *in situ*. Obejmowały one jedno badanie CID (z jednorodną konsolidacją i drenażem) oraz dziesięć badań CIU (z jednorodną konsolidacją bez drenażu). Procedura badawcza wymagała wykonania testów na co najmniej 2–3 próbkach gruntu, z wstępną konsolidacją i saturacją etapami (z kontrolą parametru ciśnienia porowego B). Ciśnienie konsolidacji zwiększono do wartości 50, 100, 200, 400, 800 kPa w zależ-

ności od głębokości pobrania próbki. Zwykle konsolidacja trwała, co najmniej 24 godziny aż do momentu, gdy nie obserwowano istotnych zmian objętości próbki. Ścinanie prowadzono z małą prędkością 0,025 mm/s w celu uniknięcia generowania dodatkowego ciśnienia porowego. Próbki gruntu o średnicy 50 mm i wysokości 100 mm były starannie formowane i długotrwanie przygotowywane do testów. Pomimo tego wiele próbek węgla brunatnego i gliny uległo uszkodzeniu i rozpadło się podczas ich wycinania. Innego rodzaju trudności były związane z wydobywaniem próbek NNS z cylindrów Osterberga wykonanych ze stali nierdzewnej. Problemy te wynikały z dużej zwięzłości próbek węgla brunatnego, jego dużego stopnia spękania, zawartości ksylicy oraz wysokiego stopnia przekonsolidowania (OCR). W trakcie wydobywania próbek z cylindrów wzrastała objętość próbek powodując ich dezintegrację na małe części. Na skutek tego, część próbek do badań trójosiowych została wycięta bezpośrednio z rdzenia wiertniczego. Próbki gruntów wycięte z rdzenia wiertniczego zostały umieszczone w plastikowych rurach osłonowych szczelnie zamkniętych w celu zabezpieczenia ich przed wysychaniem. Interpretacja wyników testów trójosiowych obejmowała wykresy naprężeń dewiatorowych, całkowitych, wykresy ścieżki naprężeń efektywnych oraz interpretację wielkości kąta tarcia wewnętrznego i spójności na podstawie hipotezy Coulomba-Mohra.

Wyniki. Wyniki badań trójosiowych wraz z wartościami całkowitych i efektywnych parametrów wytrzymałościowych przedstawiono w tabeli 1. Najniższe parametry wytrzymałościowe stwierdzono w łażach na głębokości 46,4–47,4 m, $\phi = 9,8^\circ$, $c' = 18,7$ kPa. Najwyższe w węglu brunatnym na głębokości 33,5–34,0 m, $\phi = 19^\circ$, $c' = 200$ kPa oraz łażach – 33,0–33,5 m, $\phi = 30,3^\circ$, $c' = 32$ kPa. Jednak w niektórych przypadkach możliwe było wykonanie tylko jednego lub dwóch testów z uwagi na brak możliwości pobrania próbek z próbniaka Osterberga. Część badań przerwano lub nie wykonano z powodu uszkodzenia membrany, braku zasilania lub trudności związanych z wycinaniem próbek do testów.

Monitoring *in situ*

System ciągłego monitoringu *in situ* on-line zainstalowano w grudniu 2016 r. na poziomie 42,6 m n.p.m. w odkrywcę, 210 m, poniżej naturalnego poziomu terenu. Zainstalowano go w otworze wiertniczym o głębokości 100 m, średnicy 132 mm w rurach osłonowych PCV połączonych z górotworem masą cementowo-bentonitową. Otwór był

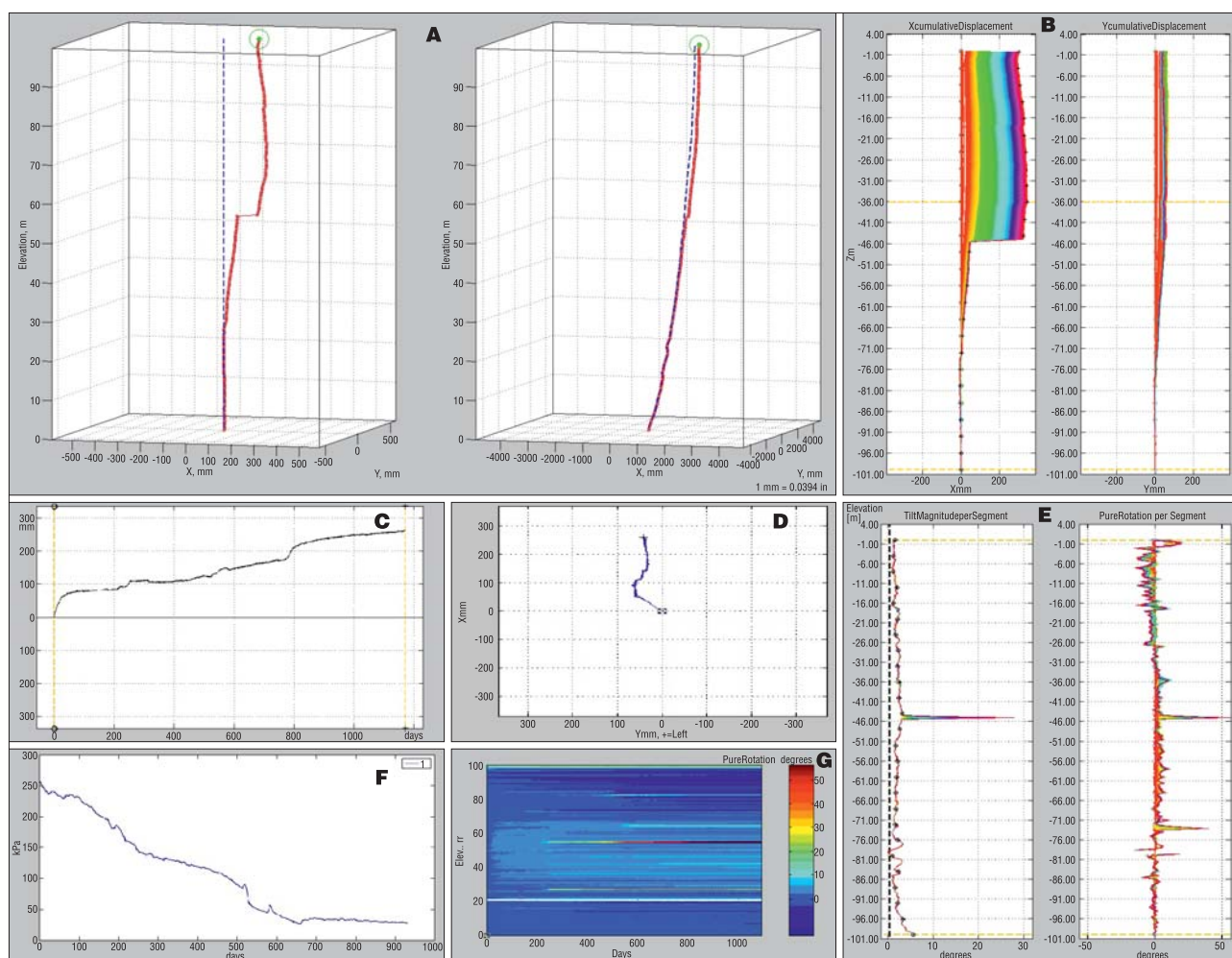


Ryc. 8. Stacja monitoringu on-line w kopalni Bełchatów
Fig. 8. The on-line monitoring station in Bełchatów Mine

zlokalizowany w północnej części zachodniego zbocza Pola Bełchatów, w obszarze zagrożenia IV–W w strefie kontaktu NE wysadu solnego (ryc. 8, 10).

Urządzenia monitoringowe składały się z dwustu czujników przemieszczeń 3D rozmieszczonych co 0,5 m. System, o głębokości 100 m, zawierał także trzy magnetometry do kontroli rotacji oraz 50 czujników temperatury gruntu rozmieszczonych co 4 metry. Ciągły system inklinometryczny zbudowany jest ze sztywnych segmentów. Segmenty mogą się przechylać w dowolnym kierunku, ale nie mogą skręcać. Długość jednego segmentu wynosi 0,5 m. Jeden segment zawiera 3 czujniki pochylenia zakres pomiarowy $\pm 45^\circ$, dokładność 0,02 mm/m, błąd przegubów $\pm 0,250$. Każdy oktet (8 segmentów) jest wyposażony w czujnik temperatury gruntu dla korekcji wpływu temperatury na działanie systemu. Maksymalny zasięg urządzeń zależy od głębokości i głębokości ruchów (zwykle nie więcej niż 500 mm). System jest wodoodporny do ciśnienia 980 kPa. Zasilany jest przez panel słoneczny i akumulator żelowy. Został on dodatkowo wyposażony w czujnik ciśnienia porowego VW umieszczony na głębokości 30 m. Dane GPRS były rejestrowane co 6 godzin i dostępne on-line od 19 grudnia 2016 r. do 9 lutego 2021 r. (wówczas system został zdemonstrowany, co było związane z eksploatacją węgla brunatnego w rejonie gdzie się znajdował). Połączenie ze stacją pomiarową było realizowane codziennie w godzinach 11–13. Zarejestrowane dane zostały zinterpretowane i przeanalizowane w programie komputerowym w postaci wykresów wielkości, skumulowanych, wektorów przemieszczeń oraz wykresów ciśnienia porowego (ryc. 9F). W celu zapewnienia wczesnego ostrzeżenia w programie wybrano wartość graniczną 30 mm na dobę.

Wyniki. Do końca lipca 2019 r. największe przemieszczenia odnotowano na głęb. 35 m, na poziomie 7 m n.p.m. (ryc. 9A, B). W kierunku nachylenia zbocza (oś x), największe przemieszczenia do 250 mm zarejestrowano na głęb. 0–45 m. W kierunku prostopadłym (y) przemieszczenia do 50 mm zarejestrowano do głęb. 70 m. Sumaryczny wypadkowy wektor przemieszczeń wyniósł 290 mm (ryc. 9C). Największe przemieszczenia wynoszące 80 mm zaobserwowano w okresie czerwiec–lipiec 2018 r. Wysokie przemieszczenia zaobserwowano również w okresie luty–kwiecień 2019 r., kiedy to wzrosły o 70 mm, luty 2017 r. o 60 mm i sierpień–wrzesień 2017 r. o 35 mm. Ich zwrot był początkowo w kierunku NE, a następnie w przybliżeniu zgodny z inklinacją zbocza ku wschodowi (ryc. 9E). Początkowe ciśnienie porowe wynoszące 258 kPa na głęb. 30 m zmniejszyło się do 25 kPa po 930 dniach (ryc. 9F). Tak duży spadek ciśnienia porowego był prawdopodobnie spowodowany eksploatacją węgla brunatnego na niższych poziomach kopalni oraz działaniem systemu odwadniania. Kierunek przemieszczeń początkowo był północno-wschodni, a następnie ruchy postępowały zgodnie z nachyleniem zbocza w kierunku wschodnim (ryc. 9D). Aby uniknąć ewentualnych błędów, wyniki z instalacji o głęb. 100 zostały skorygowane o efekty rotacji za pomocą 3 magnetometrów. Rotacja była największa na głębokości 44 m, gdzie dochodziła do 50 stopni (ryc. 9E, G). Przemieszczenia w głębszych warstwach spowodowane były złożonymi czynnikami, w tym zmianami warunków naprężenia w górotworze oraz rozpoczęciem zwałowania nadkładu w wyższych partiach zbocza zachodniego. Na wielkość przemieszczeń ma również wpływ obecność wysadu solnego i naprężenia, jakie mógł on wywierać na sąsiednie war-



Ryc. 9. Wyniki monitoringu *in situ*: **A** – model 3D przemieszczeń [mm, m], **B** – przemieszczenia skumulowane w kierunku nachylenia stoku – x, i poprzeczne – y [mm], **C** – przemieszczenia całkowite [mm], **D** – kierunek i wielkość całkowitych przemieszczeń [mm], **E** – rotacja inklinometru – wykres głębokościowy [°], **F** – zmiany ciśnienia porowego na głębokości 30 m [kPa], **G** – rotacja inklinometru wartości kątowe z trzech magnetometrów [°]

Fig. 9. Results of *in situ* monitoring: **A** – 3D displacement model [mm, m], **B** – cumulative displacements [mm], **C** – resultant vector of displacements [mm], **D** – resultant vector of displacements direction [mm], **E** – inclinometer rotation in-deep plot [°], **F** – pore pressure at 30 m depth [kPa], **G** – inclinometer rotation values of rotation angles from three magnetometers [°]

stwy. Wszystkie te czynniki zmieniały stan naprężeń w górotworze i sprzyjały uaktywnieniu się głębokich przemieszczeń.

Analizy stateczności

Metodyka. Analizy stateczności zbocza zachodniego wykonano w dwóch przekrojach poprzecznych (ryc. 10–13). Ze względu na złożoną budowę geologiczną wymagały one uogólnienia wprowadzonego modelu geometrycznego zbocza. W tym celu wydzielono dziewięć warstw o zbliżonych parametrach wytrzymałościowych. Interpretację wyznaczonych wartości obliczeniowych wytrzymałości efektywnej wykonano na podstawie zaleceń Eurokodu 7 (PN EN 1997-1:2008, PN-EN 1997-2:2009), w oparciu o tzw. doświadczenie porównawcze. Parametry wytrzymałościowe przyjęte do obliczeń zaczerpnięto z 30 badań podstawowych parametrów fizycznych gruntów i testów trójosiowego ściskania typu CIU oraz oparto na skorygowanych wartościach z wcześniejszych badań i modelowania (Poltegor-Projekt, 2002; Bednarczyk, 2017b) i przedstawiono w tabeli 2. Metoda korekcji efektywnych parametrów obliczeniowych została oszacowana z wyko-

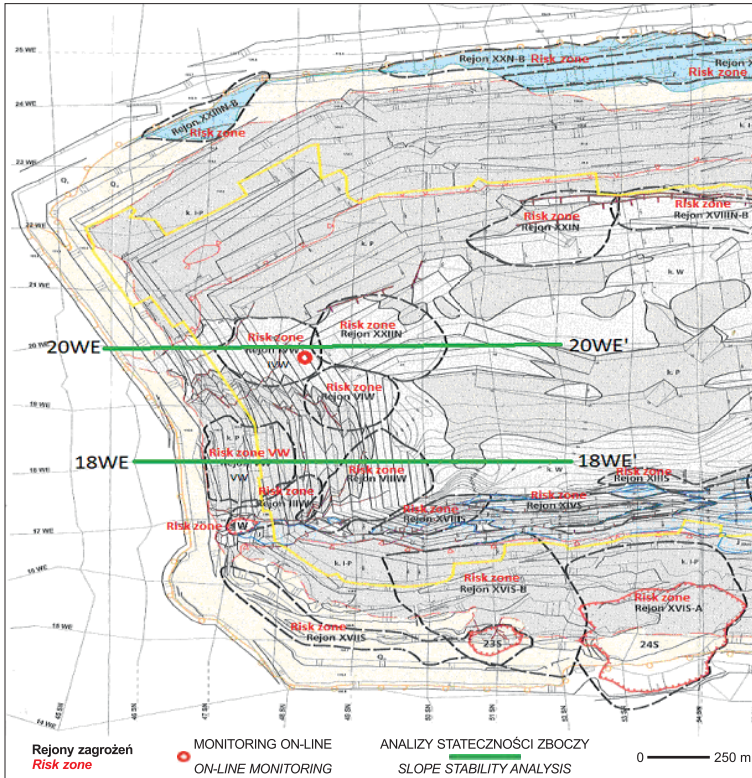
rzysaniem wcześniejszych ocen i metod (Phoon, Kulhawy, 1999; Hawrysz, 2013). W przypadku skał mezozoicznych parametry te wyznaczono, wykorzystując klasyfikację GSI (Marinos, Hoek, 2005). Przykładowa geometria wydzielonych warstw została przedstawiona na rycinie 11.

Analizy stateczności zboczy na zachodnim stoku kopalni wykonano przy użyciu programu do analizy stateczności zboczy FLAC. Wykorzystuje on metodę redukcji wytrzymałości na ścinanie (*Shear Strength Reduction Method*). Pozwala ona na odzwierciedlenie rzeczywistych warunków naprężeń występujących na zboczach, prowadzących do obniżenia wytrzymałości na ścinanie gruntu aż do etapu utraty jego stateczności. Program umożliwia zdefiniowanie warunków brzegowych przy zastosowaniu różnych modeli gruntów i skał, różnych obciążeń oraz warunków gruntowo-wodnych. Zastosowany model konstytutywny wg hipotezy Coulomba-Mohra wymagał określenia gęstości objętościowej, spójności efektywnej, kąta tarcia wewnętrznego, Liczby Poissona (ew. modułu Younga). Analizę stateczności skarp przeprowadzono w programie FLAC 8.0 2D w dwóch przekrojach 18WE i 20WE w liniach największego spadku zbocza. W obliczeniach zastosowano model konstytutywny gruntu *linear-elastic*. Uwzględnił on przybliżoną głębokość zalegania poziomu

zwierciadła wody gruntowej. Wyniki modelowania wskazują na duże zagrożenie osuwiskowe na zboczu zachodnim. Potwierdzają to obserwacje terenowe i monitoring. Należy dodać, że analizy te mają charakter przybliżony, gdyż nie uwzględniają wpływu struktury wysadu solnego Dębiny. Spowodowane to było stosunkowo dużą odległością od wysadu solnego (w skali siatki obliczeniowej dla zbocza) oraz brakiem reprezentatywnych parametrów do obliczeń dla soli znajdującej się w wysadzie.

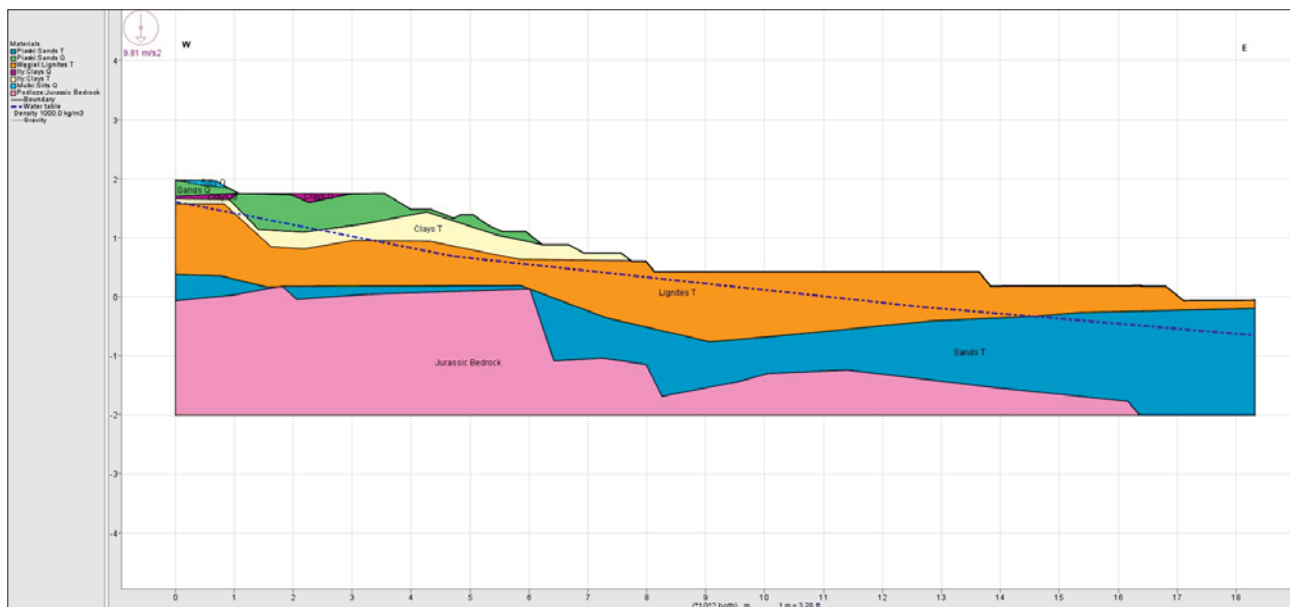
Metoda SSR okazała się skuteczna w zakresie wykrywania najsłabszych stref analizowanego zbocza. Umożliwiła ona prognozowanie wskaźnika stateczności Fos z większą dokładnością niż metoda równowagi granicznej. Metoda SSR pozwoliła na bardziej wiarygodne oszacowanie rzeczywistej powierzchni poślizgu zbocza, a nie tylko najbardziej prawdopodobnej kołowej powierzchni poślizgu jak ma to miejsce w metodzie LEM. W ten sposób obliczono relacje naprężenie/odkształcenie, prędkość odkształceń [s^{-1}], wektory prędkości maksymalnej [m/s]. Dzięki temu można było wstępnie określić powierzchnie poślizgu, strefy występowania największych deformacji oraz prędkość przemieszczeń w obrębie analizowanych zboczy.

Oszacowane w programie FLAC współczynniki stateczności Fos nie spełniały wymogów stateczności i wynosiły od 0,85 na odcinku 18 WE (w pobliżu osuwiska) do 1,14 na odcinku 20 WE (ryc. 12). W złożonych warunkach geologiczno-inżynierskich wiarygodność modelowania numerycznego może zależeć od wielu czynników związanych z niepewnością parametrów obliczeniowych, uproszczonym modelem geometrycznym, wprowadzonymi parametrami wytrzymałościowymi, długością analizowanych przekrojów oraz zastosowaną siatką obliczeniową. Analizy stateczności wykonano również z wykorzystaniem równowagi granicznej LEM, na podstawie metod Bishopa i Janbu (ryc. 13). Wyniki wszystkich analiz przedstawiono w tabeli 3. Wyniki analizy lokalnej i wizji terenowej wskazują na duże zagrożenie osuwiskowe na zachodnim zboczu kopalni. Na powstanie osuwiska złożyło się wiele czynników, takich jak wpływy eksploatacji górniczej, parametry geometryczne i wytrzymałościowe zbocza oraz wpływ wysadu solnego. Wpływ struktury solnej nie został uwzględniony w tych wstępnych analizach lokalnych ze względu na stosunkowo dużą odległość od wysadu solnego (od środka wysadu do górnej granicy zbocza



Ryc. 10. Lokalizacja analiz stateczności skarpy, stref ryzyka i oprzyrządowania monitorującego

Fig. 10. Location of slope stability analyses, risk zones, and monitoring instrumentation



Ryc. 11. Analiza stateczności skarpy 20WE, metoda SSR, warstwy geologiczno-inżynierskie

Fig. 11. Slope stability analysis 20WE, SSR Method, geological-engineering layers

Tab. 2. Parametry wytrzymałościowe zaimplementowane w analizie numerycznej**Table 2.** Strength parameters implemented in the numerical analysis

| Nr No. | Typ gruntów / skal Soil / rock type | [kN/m ³] | c [kPa] | φ° |
|--------|---|----------------------|---------|------|
| 1 | piasek (Q) sand | 18,5 | 1,0 | 30,0 |
| 2 | glina zwałowa (Q) till | 21,8 | 40,0 | 9,2 |
| 3 | mulek (Q) mud | 21,3 | 40,0 | 15,0 |
| 4 | ił (Q) clay | 20,8 | 80,0 | 5,3 |
| 5 | ił (N) clay | 21,1 | 89,0 | 5,8 |
| 6 | węgiel brunatny (N) lignite albo brown coal | 11,8 | 170,0 | 14,8 |
| 7 | piasek (N) sand | 19,5 | 1,0 | 32,0 |
| 8 | podłoże mezozoiczne wapienie, margle (M) Mesozoic bedrock, limestones, marls | 25,0 | 338,0 | 27,1 |

Tab. 3. Wyniki analiz stateczności na zachodnim zboczu Pola Belchatów**Table 3.** Results of slope stability analysis at the western slope of Belchatów Mine of the Belchatów Field

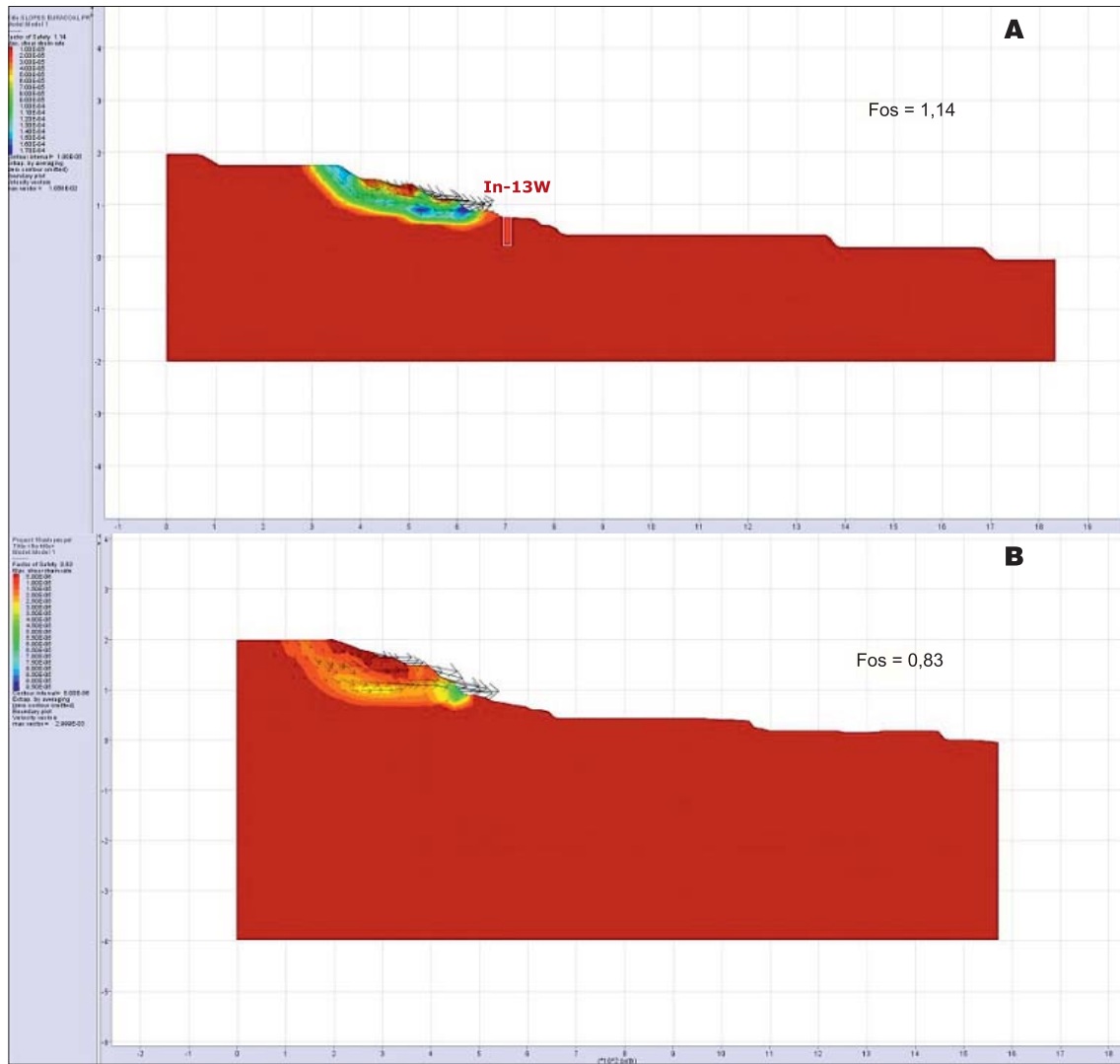
| Metoda Method | Fos 20 WE | Fos 18 WE |
|------------------|--------------|--------------|
| SSR Flac | 0,83 | 1,14 |
| LEM Bishop | 1,34 | 1,16 |
| LEM Janbu | 1,46 | 1,27 |

zachodniego ok. 500 m) i brak reprezentatywnych danych, ale niewątpliwie należy go wprowadzić do przyszłych analiz. Powinno to uwzględniać właściwości reologiczne soli w wydzie solnym i otaczających ją warstwach. W tak złożonych warunkach geologiczno-inżynierskich wiarygodność analiz stateczności zależy od kilku czynników. Błędy interpretacyjne mogą mieć różne podłoże. Najczęściej są one związane są z niepewnością parametrów obliczeniowych oraz uproszczonym modelem geometrycznym. Mogą także wynikać z niewłaściwej aproksymacji modeli geometrycznych, stosowania uproszczonych parametrów wytrzymałościowych, dużej długości analizowanych przekrojów oraz zastosowanej nieodpowiedniej siatki obliczeniowej.

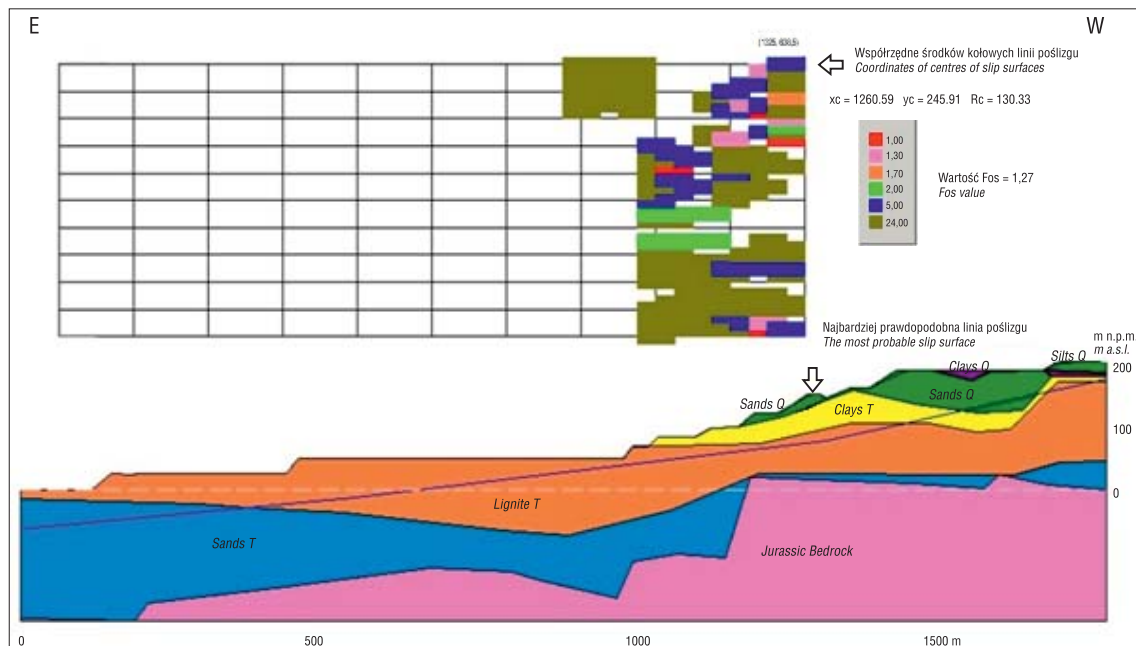
Zbocze zachodnie i jego najbliższe otoczenie są podporządkowane bardzo złożonemu stanowi naprężeń. Znaczne zmiany naprężeń na zboczach spowodowane eksploatacją węgla brunatnego i oddziaływaniem kopuły solnej mogą być przyczyną procesów osuwiskowych, polegających na znacznych deformacjach, relaksacji naprężeń, otwieraniu się naturalnych spękań, infiltracji i zmianie warunków przepływu wód gruntowych. Duże zmiany naprężeń na skutek bardzo głębokiej eksploatacji mogą powodować reaktywację uskoków, powierzchni tektonicznych i spękań oraz wywoływać przemieszczenia wgłębne. W analizie nie uwzględniono obniżonych parametrów geotechnicznych na powierzchniach sprzyjających aktywacji osuwisk, np. na preferowanych granicach warstw, granicy czwartorzęd / neogen, paleosuwiskach itp. Wprowadzenie tych powierzchni i związane z tym obniżone wartości parametrów wytrzymałościowych mogą również niekorzystnie wpływać na wartość *Fos*.

PODSUMOWANIE

Prace prezentowane w artykule doprowadziły do wdrożenia w KWB *Belchatów* nowych metod monitoringu. Uczestniczyły w nich kilka europejskich ośrodków badawczych i naukowych. Wyniki badań dostarczyły nowych danych dotyczące osuwisk, ciśnienia porowego i stateczności zboczy do kontroli przemieszczeń w trakcie eksploatacji. Przemieszczenia powierzchni terenu wokół kopalni były badane przy użyciu pomiarów PSI na dużym obszarze. Analizy te wykazały, że metoda PSI ma ograniczenia dla dużych prędkości przemieszczeń oraz w przypadku głęboko położonych, słabo widocznych obszarów, w których przemieszczenia zachodzą zgodnie z kierunkiem ruchu dla satelitów. Pomiary dla poszczególnych zboczy pozyskano także za pomocą skanowania LiDAR UAV oraz TLS. Pomiary inklinometryczne *in situ* wykryły przemieszczenia o wielkości 290 mm do głęb. 46 m (poziom od 40 do -6 m n.p.m.) w czasie ponad 2,5 roku (930 dni). Na podstawie pomiarów PSI określono przemieszczenia 781 206 punktów w siatce 30 × 30 km. W ciągu dwóch lat pomiarów zidentyfikowano 14 stref przemieszczeń. Występowały one na południowym zboczu Pola Belchatów, w obrębie zewnętrznego zwałowiska nadkładu Pola Szczerców oraz w kilku innych rejonach. Największe osiadania, dochodzące do 60 mm/rok, stwierdzono na wschodnim zboczu zewnętrznego zwałowiska nadkładu Pola Szczerców. W rejonie zbocza zachodniego Pola Belchatów, w którym zainstalowano monitoring wgłębny, w pomiarach PSI stwierdzono znacząco mniejsze przemieszczenia niż wykryte poprzez monitoring wgłębny. W celu bardziej dokładnego scharakteryzowania przemieszczeń powierzchniowych zbocza zachodniego metodą satelitarną PSI konieczne jest zastosowanie specjalnych reflektorów. Skanowanie LiDAR UAV oszacowało przemieszczenia powierzchni na zachodnim stoku na 7 mm w ciągu 3 miesięcy. Porównanie wyników z różnych metod monitoringu potwierdziło różnice pomiędzy przemieszczeniami powierzchniowymi, które dobrze charakteryzują duże obszary, a przemieszczeniami wgłębnymi gruntów *in situ*. Należy podkreślić, że przemieszczenia powierzchniowe i wgłębne, szczególnie dotyczące głębokich osuwisk mogą wykazywać inne wyniki. Do prognozowania zachowania stref osuwiskowych najbardziej dokładne są pomiary wgłębne *in situ*. Metody inklinometryczne mogą wykryć małe przemieszczenia gruntu wcześniej i dokładniej. Te małe przemieszczenia zazwyczaj poprzedzają duże osuwiska na najbardziej zagrożonych obszarach. Konwencjonalne inklinometry zwykle mierzą przemieszczenia gruntu do 110 mm i mogą nie być właściwe przy większych zakresach. Należy również zaznaczyć, że nie każdy skaner laserowy sprawdzi się w przypadku zboczy skanowanych z odległości ok. 3 km, co było wymagane w przypadku kopalni *Belchatów*. System monitoringu on-line wyposażony w magnetometrię pozwolił mierzyć znacznie większe wielkości przemieszczeń, które do lutego 2021 r. osiągnęły 300 mm. Stosowane metody powinny być zawsze dopasowane do rodzaju i wielkości przemieszczeń. Na obszarach o dużych przemieszczeniach, liczonych w metrach, instalacja



Ryc. 12. Analiza stateczności skarpy, metoda SSR 20WE Fos = 1,14 (A), 18 WE Fos = 0,83 (B)
 Fig. 12. Slope stability analysis, SSR method, 20WE Fos = 1.14 (A), 18 WE Fos = 0.83 (B)



Ryc. 13. Analiza stateczności skarpy, 20WE, metoda LEM Janbu, Fos = 1,27
 Fig. 13. Slope stability analysis, 20WE, LEM Janbu Method, Fos = 1.27

cja oprzyrządowania *in situ* może być bezużyteczna i nieefektywna. Lepsze możliwości mogą w takim przypadku dawać systemy skaningu lotniczego. Pozwalają one na stosunkowo szybkie pozyskiwanie różnorodnych danych monitoringowych nawet w warunkach dużych przemieszczeń. Dodatkowo mogą być wykorzystane do określenia warstw w obrębie zboczy, lokalizacji struktur geologicznych, uskoków i nieciągłości. Dane lotnicze, satelitarne i TLS powinny być zawsze starannie kalibrowane poprzez standardowe geodezyjne punkty odniesienia, ujednolicone w czasie i w miarę możliwości skalowane inklinometrycznymi pomiarami wgłębnymi. Dokładne porównanie wyników przemieszczeń powierzchniowych wykonanych na podstawie pomiarów satelitarnych PSI, lotniczych LiDAR UAV, za pomocą naziemnego skanowania laserowego oraz monitoringu *in situ* było utrudnione z powodu różnych okresów wykonywanych pomiarów oraz uwarunkowaniami poszczególnych metod pomiarowych. Dla zbocza zachodniego, gdzie wykonywano pomiary przemieszczeń wgłębnych *in situ* i przemieszczeń powierzchniowych, wykazały one znaczące różnice. Przemieszczenia określone za pomocą PSI wyniosły 10 mm, LiDAR UAV – 24 mm (przy dokładności pomiarów ok. 2–3 mm). Przemieszczenia wgłębne *in situ* w tym samym okresie wyniosły 100 mm do głęb. 46 m (przy dokładności pomiaru rzędu 0,1–0,3 mm). Należy zaznaczyć, że przemieszczenia powierzchniowe i wgłębne, chociaż są ze sobą związane, mają inne wartości. Za pomocą pomiarów przemieszczeń powierzchniowych zazwyczaj nie można określić całkowitej wielkości przemieszczeń wgłębnych. Wszystkie te metody mają duży potencjał, jednak powinny być starannie skalibrowane. Za pomocą monitoringu *in situ* sprawdzono stateczność zbocza zachodniego. Charakteryzowało się one niskim wskaźnikiem stateczności $Fos = 0,83–1,10$. W pozostałych rejonach kopalni badania satelitarne PSI pozwoliły na wydzielenie 14 stref osuwiskowych na obszarze całego zakładu górniczego i obszarach przyległych.

Wykonane badania mają swoje ograniczenia związane z zakresem badań, przyjętymi okresami badań, różnymi rodzajami przemieszczeń będących przedmiotem pomiarów, zespołami badawczymi oraz zastosowaną aparaturą badawczą. Część z wykonanych prac miała charakter testowy i powinna być kontynuowana. Przemieszczenia powierzchniowe interpretowane na podstawie pomiarów PSI różniły się od tych interpretowanych na podstawie pomiarów *in situ*, ponieważ mają one ograniczenia związane ze zmniejszoną widocznością położonych głęboko w odkrywce punktów i kierunkiem ruchu satelity. Ograniczenia dla PSI były szczególnie widoczne na obszarach osuwiskowych, gdzie wielkość przemieszczeń była bardzo duża, oraz na zwałowiskach, gdzie morfologia zmieniała się bardzo szybko. Poza tymi ograniczeniami, pomiary PSI były bardzo korzystne dla wczesnego wykrywania inicjacji osuwisk na dużych obszarach. Całkowite wyeliminowanie zagrożeń osuwiskowych w kopalniach odkrywkowych węgla brunatnego nie jest możliwe. Znajomość procesów zachodzących w przeszłości, doświadczenia z wdrażania nowych metod badawczych i duża ilość nowych danych pomiarowych pozyskanych w ramach projektu Slopes powinny się przyczynić do lepszej identyfikacji zagrożeń i doboru optymalnych środków przeciwdziałania. Na obszarach szczególnie narażonych na osuwiska przydatne może być opracowanie indywidualnych metod zdalnego

monitoringu oraz szczegółowych procedur interpretacji wielkości, głębokości i kierunków przemieszczeń. Należy też podkreślić, że prognozowanie występowania osuwisk w polskich kopalniach odkrywkowych węgla brunatnego jest zazwyczaj bardzo złożone. Wdrożenie przedstawionych metod powinno mieć korzystny wpływ na lepsze poznanie zagrożeń i zwiększenie możliwości wczesnego przeciwdziałania.

Projekt UE SLOPES RFCS-CT-2015-00001 *Smarter Lignite Open Pit Engineering Solutions* (Inteligentne Rozwiązania Inżynierskie dla Kopalni Węgla Brunatnego) był finansowany przez Europejski Fundusz Badawczy Węgla i Stali oraz Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, bez których nie byłaby możliwa jego realizacja. Chciałbym także podziękować firmie PGE GIEKSA Oddział w Belchatowie za udostępnienie terenu badań i pomoc w realizacji projektu oraz partnerom projektu Slopes, a w szczególności jego koordynatorowi – prof. Alec Marshall z Centrum Geomechaniki Uniwersytetu Nottingham (UK), uczestnikom projektu z Camborne School of Mines Uniwersytetu Exeter (UK), Instytutu INERIS (Francja), Instytutu CERT (Grecja), Instytutu VUHU (Czechy), firmom geotechnicznym GECONTROL i SUBTERRA (Hiszpania) oraz firmie GAP (spółka Politechniki Bari – Włochy) za pomoc w realizacji projektu. W tym miejscu pragnę też podziękować Redakcji Przeglądu Geologicznego za umożliwienie publikacji artykułu i za uwagi Recenzentów.

LITERATURA

- ANG A.H.S., TANG W.H. 2007 – Probability Concepts in Engineering: Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering, 2e Instructor Site: Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering second edition, Wiley & Son, 199–244.
- BAECHER G.B., CHRISTIAN J.T. 2003 – Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering. Wiley & Sons, 11–14.
- BEDNARCZYK Z. 2017a – Slope Stability Analysis for the Design of a New Lignite Open-Pit Mine. Proc. Eng., <https://doi.org/10.1016/j.pro-eng.2017.05.153>
- BEDNARCZYK Z. 2017b – Landslide Monitoring and Counteraction Technologies in Polish Lignite Opencast Mines, Advancing Culture of Living with Landslides, Vol 5, Landslides in Different Environments edited by Matjaz Mikoz, Vit Vilimek, Yueping Yin, Kyoji Sassa, Springer International; doi 10.1007/978-3-319-5348
- BEDNARCZYK Z. 2018 – Identification of flysch landslide triggers using nearly real-time monitoring data-an example from the Carpathian Mts., Poland. Eng., Geol., 244: 41–56.
- BEDNARCZYK J., NOWAK A. 2010 – Strategie i scenariusze rozwoju produkcji energii elektrycznej z węgla brunatnego w obecnych warunkach. Górn. Geoinż., 34 (4): 67–83.
- BEDNARCZYK Z., SANDVEN R. 2004 – Comparison of CPTU and laboratory tests interpretation of Polish and Norwegian clays. [W:] Fonseca V. (red.), International Geotechnical and Geophysical Site Characterization Conference ISC-2 Porto, Millpress, 1791–1799.
- CEN (1994). EUROCODE 7, Geotechnical design. Part 1: Gen. rules, ENV1997-1E. Brussels.
- CHRISTIAN J.T., LADD C.C. 1994 – Reliability applied to slope stability analysis. J. Geot. Engin., 120 (12): 2180–2207.
- CIUK E., PIWOCKI M. 1980 – Geologia trzeciorzędu Rowu Kleszczowa i jego otoczenia. Przew. LII Zjazdu PTG: 38–56.
- COOPER M.A. 1987 – Control Surveys in Civil Engin. William Collins Sons & Co., London.
- CRUDEN D.M., VARNES D.J. 1996 – Landslide types and processes. [W:] Turner A.K., Schuster G.P. (red.), Landslides, investigation and mitigation, Vol. 3. Special report 247, Transportation Res. Board, Nat. Res. Council National Acad. Press, Washington: 36–75.
- CZARNECKI L., ORGANISCIAK B. 2015 – Zagrożenie utraty stateczności zbocza południowego zbudowanego ze skał mezozoicznych w obszarze rowu drugiego rzędu. III Kongres Górniczy C-5.
- CZARNECKI L., FELISIAK I. 2004 – Paleo-landslide block of the Southern Frame Fault and its influence on mining operations in the Second-order Graben at the Belchatow Lignite Mine. Warsztaty Górnicze Conf. Proc., 125–138.
- DANE EUROSTATU 2018 – Wydobywanie węgla w UE. | Selected News <https://selectednews.info/pl/wydobywanie-wegla-w-ue-dane-eurostatu/>; dostęp 18.08.2021 r.

- DEMIREL N., EMIL M.K., DUZGUN H.S. 2011 – Surface coal mine area monitoring using multi-temporal high-resolution satellite imagery. *Inter. J. Coal Geol.*, 86: 3–11.
- DMITRUK S. 1984 – Problems of geotechnical modeling in open-cast mining. *Wyd. Geol.*
- FLISIAK J., RYBICKI S., TYLIKOWSKI M. 2014 – Landslide risk assessment in Belchatow and Turow opencast mines. *Prz. Geol.*, 10/2: 563–572.
- HAWRYSZ M. 2013 – Metody szacowania efektywnych parametrów wytrzymałościowych. *Geoinż. Drogi Mosty Tunele*, 3: 34–44.
- JANECKI W., BEDNARCZYK Z., ZEMBRONSKI J. 1999 – Rozpoznanie warunków geotechnicznych na zboczu południowym KWB Bełchatow w rejonie zejścia do rowu drugiego rzędu na poziomie +124/+94 m n.p.m. w czwartym piętrze górniczym pomiędzy liniami przekrojów 60 i 61 SN. *Geosoft Wrocław*.
- JOŃCZYK W., ORGANIŚCIAK B. 2010 – Zagrożenia naturalne w KWB Bełchatow rozpoznanie i przeciwdziałanie. *Górn. Geoinż.*, 34 (4): 249–257.
- KASZTELEWICZ Z. 2012 – Węgiel brunatny w Polsce i na świecie. *Węgiel Brunatny*, 78 (1): 7–13.
- KOSSOWSKI L., OLSZEWSKI B., SOWINSKI L., WOJTURSKA M., SOWA J. 1992 – Reinterpretacja budowy geologicznej KWB Bełchatow pomiędzy liniami 42-70NS. *Arch. KWB Bełchatow*.
- KULHAWY F.H. 1992 – On the evaluation of static soil properties. In: *Geotechnical Special Publication 31: Stability and performance of slopes and embankments II*, ASCE. Berkeley, California: 95–115.
- LU D., WENG Q. 2007 – A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *Intern. J. Remote Sensing*, 28: 823–870.
- MARINOS VP., HOEK E. 2005 – The Geological Strength Index: Applications and limitations. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 64: 55–65.
- MARSHALL A., REZANIA M., HERON C., MARSH S., SMITH M., ZANGANEH H., MASOUDIAN M., HASHEMI A., BOWMAN A., FERNÁNDEZ A., GULLÓN A., RODRIGO C., DE CABO M., POZO V., DE PAZ D., GALERA J., BEDNARCZYK Z., SVOBODA P., BURDA J., KOUKOUZAS N., DELIVERIS A., ZEVLIS I., COGGAN J., EYRE M., VANNESCHI M., COCCIA S., CAUVIN L., AL HEIB M., RICHARD T. – 2019 Draft Final Slopes Project Report Deliverable 4.3.1. European Commission Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel, Technical Group: TGCI, Grant Agreement number RFCR-CT-2015-00001 Project Slopes – Smarter Lignite Open Pit Engineering Solutions: 1–120.
- NGUYEN V.U., CHOWDHURY R.N. 1984 – The probabilistic study of spoil pile stability in strip coal mines - two techniques compared. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geom.*, A.21: 303–312.
- PATRZYK J. 1996 – Zagrożenie osuwiskowe w KWB Bełchatow. *Mies. WUG*, 2/96: 13–16.
- PHOON K., KULHAWY F.H. 1999 – Characterization of geotechnical variability, *Canadian. Geotech. J.*, 36: 612–624.
- PN EN 1997-1:2008 – Eurocode 7, Projektowanie Geotechniczne. Cz. 1: Zasady ogólne.
- PN-EN 1997-2:2009 – Eurocode 7, Projektowanie Geotechniczne. Cz. 2: Badania polowe.
- POLTEGOR-PROJEKT 2002 – Aktualizacja projektu dla Pola Szczerców. *Wydobycie maksymalne wraz z biznesplanem*, Wrocław. Nr projektu – 1030.1325.002.
- RYBICKI S. 1996 – Osuwiska w Polskich kopalniach odkrywkowych węgla brunatnego. *Wyd. PKrak.*, 57–164.
- SCHROETER L., GLÄBER C. 2011 – Analyses and monitoring of lignite mining lakes in East Germany with spectral signatures of Landsat TM. *Int. J. Coal Geol.*, 86: 27–39.
- WELSCH W., HEUNECKE O., KUHLMANN H. 2000 – *Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen* [W:] Möser et al. (red.), Wichmann Verlag, Heidelberg. Wilkins.
- WHITMAN R.V. 1984 – Evaluating calculated risk in geotechnical engineering. *J. Geot. Engin.*, 110 (2): 143–188.
- WILKINS R., BASTIN G., CHRZANOWSKI A. 2003 – ALERT: a fully automated real-time monitoring system. [W:] *Proc. of the 11th FIG Symposium on Deformation Measurements*, Santorini, Greece: 209–216.
- WU T.H.H. 2008 – Reliability analysis of slopes. [W:] *Reliability-based Design in Geotechnics*.

Praca wpłynęła do redakcji 31.05.2021 r.
Akceptowano do druku 23.08.2021 r.