

ZAGROŻENIA OSUWISKOWE W POLSKICH ODKRYWKOWYCH KOPALNIACH WĘGLA BRUNATNEGO, PRZYKŁADY PRZECIWDZIAŁANIA ORAZ MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA ZDALNEGO MONITORINGU W CELU OGRANICZENIA RYZYKA

LANDSLIDE HAZARD IN POLISH LIGNITE OPENCAST MINES AND POSSIBILITIES OF ITS REMOTE MONITORING

ZBIGNIEW BEDNARCZYK¹

Abstrakt. Osuwiska w kopalniach odkrywkowych węgla brunatnego zmniejszają efektywność eksploatacji i mogą zagrażać środowisku. Przeciwdziałanie jest trudne ze względu na duże objętości osuwisk, prędkości przemieszczeń oraz głębokość eksploatacji. Szczególne znaczenie może mieć monitoring z wykorzystaniem nowoczesnych metod pomiarowych. W celu przedstawienia specyficznych uwarunkowań geologiczno-inżynierskich oraz skały występujących zagrożeń, w pierwszej części artykułu zaprezentowano przykłady osuwisk w największych polskich kopalniach węgla brunatnego oraz metody przeciwdziałania. W drugiej części zaprezentowano rezultaty badań w projekcie UE RFCS Slopes „Inteligentne metody inżynierskie w kopalniach odkrywkowych węgla brunatnego”. W ramach projektu, realizowanego w sześciu krajach europejskich, autor wykonał badania na zachodnim zboczu Pola Bełchatów. W grudniu 2016 r. zainstalowano tam pierwszy w polskiej kopalni odkrywkowej zdalny system monitoringu osuwisk. Zlokalizowana na poziomie 42 m n.p.m. stacja umożliwia monitoring do głębokości 100 m. W ciągu 2,5 roku zaobserwowano przemieszczenia 280 mm do głębokości 45 m. Prace obejmowały wiercenia rdzeniowe, badania podstawowych parametrów fizycznych i wytrzymałościowych gruntów oraz modelowanie numeryczne. Stwierdzono tam niskie wartości $F_s = 0,83-1,14$. Interferometria satelitarna PSI w wysokiej rozdzielczości wykryła przemieszczenia do 60 mm. Partnerzy projektu Slopes wykonali skanowanie lotnicze LiDAR z użyciem drona oraz naziemne skanowanie laserowe TLS. W podsumowaniu określono możliwości wczesnego ostrzegania oraz uwarunkowania dotyczące zastosowania poszczególnych rodzajów pomiarów monitoringowych.

Słowa kluczowe: geologia inżynierska, monitoring osuwisk, górnictwo odkrywkowe węgla brunatnego.

Abstract. Landslides in opencast lignite mines reduce mining efficiency and may endanger the environment. It is difficult to counteract them due to its high volumes, the displacement speed and the depth of exploitation. Landslide monitoring with the use of modern measurement methods can be of particular importance. In order to present specific geological-engineering conditions and the scale of hazards, the first part of the paper presents examples of landslides in the largest Polish lignite opencast mines and counteraction methods. The second part describes the results of the EU RFCS Slopes “Smart lignite open-pit engineering solutions”. Within the framework of this project, carried out in six European countries, the author had opportunity to investigate the western slope of the Bełchatów Field. In December 2016, the first on-line landslide monitoring system in a Polish opencast mine was installed there. Located at 42 m a.s.l., the station enables monitoring up to a depth of 100 m. During 2.5 years, displacement of 280 mm to a depth of 45 m was observed. The works included core drillings, studies of basic physical and strength parameters of soils, and numerical modelling. Low values of $F_s = 0.83-1.14$ were found there. High-resolution PSI satellite interferometry detected displacements of up to 60 mm. Slopes project partners performed also LiDAR aerial drone scanning and TLS ground laser scanning. In summary, early warning capabilities and conditions for the usage of different types of monitoring techniques are presented.

Key words: engineering geology, landslide monitoring and counteraction, lignite opencast mining.

¹ „Poltegor-Instytut” Instytut Górnictwa Odkrywkowego, ul. Parkowa 25, 51-616 Wrocław; e-mail: zbyszb@poczta.onet.pl

WSTĘP

W artykule omówiono największe zagrożenia osuwiskowe jakie wystąpiły w polskich kopalniach odkrywkowych, metody stabilizacji oraz zdalnego monitoringu. Monitoring osuwisk w kopalniach węgla brunatnego napotyka na wiele utrudnień związanych z dużą głębokością i wielkościami przemieszczeń obserwowanych na zboczach odkrywek i zwałowisk nadkładu. Rejestrowanie i zapobieganie tym procesom jest bardzo ważne, ponieważ wydobywanie węgla brunatnego, jednego z najtańszych źródeł energii, jest wciąż istotne w procesie w produkcji energii elektrycznej w wielu krajach europejskich. Eksploatacja 64 mln ton węgla brunatnego rocznie lokuje Polskę na 6 miejscu na świecie (stanowi to ok. 30% wydobycia węgla brunatnego w Niemczech; Bednarczyk, Nowak, 2010; Kasztelewicz, 2012). Umożliwia to produkcję ok. 30% energii elektrycznej w Polsce. Dotychczasowe wydobycie ok. 2,4 mld ton węgla i związane z tym zdejmowanie ok. 9,5 mld ton nadkładu w Polsce wiąże się niestety z poważnymi zagrożeniami geotechnicznymi i geosrodowiskowymi, których przykłady zostały szczegółowo przedstawione w artykule. Osuwiska są najczęściej związane z głębokością eksploatacji, formowaniem wysokich składowisk nadkładu, złożoną budową geologiczną, obecnością w obrębie zboczy odkrywek i zwałowisk nadkładu gruntów ilastych o niekorzystnych parametrach geotechnicznych. Innymi czynnikami mogącymi wpływać na rozwój osuwisk są opady atmosferyczne, wahania poziomu wód gruntowych, wysychanie gruntów na zboczach, odprężenie górotworu, procesy krasowe i zjawiska sejsmiczne. Duża skala zagrożeń może powodować poważne straty ekonomiczne i negatywnie wpływać na środowisko (Dmitruk, Suchnicka, 1975). Osuwiska te można zdefiniować jako osuwiska ziemne (*earth flow*) wywołane przez działalność górnictwa (Cruden, Varnes, 1996). Interpretacja ich reprezentatywnych parametrów wytrzymałościowych jest zazwyczaj utrudniona ze względu na wysoki stopień przekonsolidowania gruntów ilastych i ich częściową saturację w odkrywkach. Trudne do reprezentatywnej charakterystyki są także parametry wytrzymałościowe antropogenicznych gruntów zwałowych (Bednarczyk, 2017; Bednarczyk 2018b). W celu wczesnego wykrywania zagrożeń i skutecznego przeciwdziałania szczególną rolę mogą mieć zdalne pomiary monitoringowe, które pozwalają z wyprzedzeniem rozpoznawać aktywację dużych przemieszczeń. Przykładem tego typu badań mogą być prace wykonywane przez autora w ramach projektu UE RFCS-CT-2015-00001 Slopes w KWB Bełchatów. Projekt ten realizowany był przez partnerów z sześciu krajów europejskich w czeskich, greckich, hiszpańskich i polskich kopalniach węgla brunatnego. Podstawowym zadaniem projektu była odpowiedź na szereg ważnych problemów geotechnicznych związanych ze statecznością zboczy w górnictwie odkrywkowym węgla brunatnego. Projekt miał na celu praktyczne zastosowanie nowych metod monitoringu i analizy danych. W celu wiarygodnej charakterystyki możliwych zagrożeń partnerzy projektu przeanalizowali ilościowo i jakościowo dostępne parametry geologiczno-inżynierskie

poszczególnych złóż oraz nowo pozyskane dane geotechniczne. Poddane one zostały także analizie statystycznej. Szczególne znaczenie miała szczegółowa charakterystyka danych geologicznych takich jak np. rodzaj występujących gruntów i skał, parametry wytrzymałościowe, kierunek upadu warstw, występowanie uskoków, fałdów, głębokość wód gruntowych, obciążenia statyczne, i dynamiczne. Parametry te były ważnym kluczem do wyboru instrumentów pomiarowych i definicji parametrów, które zostały objęte monitoringiem. Umożliwiło to uzyskanie reprezentatywnych danych do oceny ryzyka, ich walidacji, symulacji numerycznych i indywidualnie dostosowanych strategii przeciwdziałania.

W Polsce prace wykonywane były w KWB Bełchatów, gdzie na zachodnim zboczu Pola Bełchatów na poziomie +42 m n.p.m., w grudniu 2016 r. zainstalowano pierwszy w polskiej kopalni odkrywkowej system monitoringu przemieszczeń i ciśnienia porowego on-line. Podobny, pierwszy system monitoringu osuwisk on-line w Polsce, był wcześniej w 2010 r. przez autora zainstalowany na osuwisku karpackim w rejonie Szymbarku (Bednarczyk 2011, 2012, 2018a). System w KWB Bełchatów ma 100 m głębokości oraz umożliwia ciągłą obserwację występujących przemieszczeń i ciśnienia porowego w czasie rzeczywistym. W artykule szczegółowo opisano wyniki badań geologiczno-inżynierskich i monitoringu *in situ* wykonywanych w ramach projektu Slopes przez autora w Polsce oraz wyniki innych rodzajów monitoringu wykonywanych przez zagranicznych partnerów projektu w Bełchatowie. Monitoring lotniczy z wykorzystaniem drona, naziemne skanowanie laserowe oraz satelitarne skanowanie laserowe w wysokiej rozdzielczości dostarczyły nowych danych dotyczących przemieszczeń powierzchniowych. Uzyskane wyniki zostały wykorzystane w modelowaniu numerycznym, co umożliwiło lepsze poznanie występujących zjawisk. Przetestowanie poszczególnych metod pomiarów w KWB Bełchatów i określenie ich uwarunkowań dla występujących w polskich kopalniach odkrywkowych węgla brunatnego zagrożeń geotechnicznych może być wykorzystane do opracowania bardziej skutecznych strategii monitoringu i wczesnego ostrzegania.

PRZYKŁADY NAJWIĘKSZYCH ZAGROŻEŃ GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKICH, ZASTOSOWANYCH METOD MONITORINGU I STABILIZACJI W POLSKICH KOPALNIACH WĘGLA BRUNATNEGO

Osuwiska aktywowane przez działalność górnictwa w kopalniach odkrywkowych węgla brunatnego i towarzyszących im zwałowiskach nadkładu występują od wielu lat i są zjawiskami powszechnymi. Tego typu zagrożenia występują we wszystkich polskich kopalniach odkrywkowych w rejonie Bełchatowa (Bełchatów, Szczerców), Bogatyni (Turów) oraz w rejonie Konina. Największe dotychczas zarejestrowane osuwiska występowały w KWB Turów i KWB Bełchatów. Zaprezentowane w artykule metody zdalnego monitoringu dotyczą

pomiarów wykonywanych KWB Bełchatów jednak w celu lepszego przedstawienia problematyki i skali występujących zjawisk omówiono także największe zagrożenia, które wystąpiły w innych kopalniach węgla brunatnego w Polsce. Największa działająca w Europie kopalnia odkrywkowa węgla brunatnego Bełchatów prowadzi eksploatację o głębokości przekraczającej 310 m na dwóch polach, Bełchatów – czynnym do 2020 r. (użytkowanie do 2026 r.) i Szczerców – do 2038 r. Eksploatacja prowadzona na Polu Bełchatów, ze wschodu na zachód, powodowała stałe zagrożenie osuwiskami na skarpach północnych i południowych nachylonych w stosunku 1:4. Co roku rejestrowano tam setki małych i dużych osuwisk o kubaturze wynoszącej nawet do kilku milionów metrów sześciennych (Patrzyk, 1996; Rybicki, 1996; Jończyk i in., 2013). Szacuje się, że ponad 85% osuwisk występujących w odkrywce spowodowanych eksploatacją górniczą miało charakter strukturalny (Flisiak i in., 2014) a osuwiska często powstawały w strefie kontaktów iłów i węgla brunatnych (Kaczmarczyk, 2003). Przemieszczenia masowe miały najczęściej objętość od kilku tysięcy do 3,5 mln m³, a ich prędkość wynosiła od 2 mm do nawet 2 m dziennie. Największe osuwiska występowały na południowym zboczu Pola Bełchatów powyżej tzw. rowu drugiego rzędu, głębokiej struktury zapadliskowej charakteryzującego się największą miąższością węgla oraz występowaniem ponad nią na zboczu południowym gruntów paleosuwiskowych. Na zboczu południowym osuwiska występowały praktycznie w ciągu całej eksploatacji. Inne poważne zagrożenia występowały także na zboczu północnym. Dotyczyło to szczególnie ilastych utworów zastoiskowych, o niekorzystnych parametrach wytrzymałościowych, gdzie zlokalizowane są ciągi transportowe. W ostatnim czasie, wraz ze zbliżającym się terminem zakończenia eksploatacji na polu Bełchatów i prowadzeniu jej w pobliżu wysadu solnego Dębiny, zagrożenia te pojawiły się także na zboczu zachodnim, gdzie przeprowadzono badania w ramach projektu Slopes. W KWB Bełchatów osuwiska powstawały najczęściej na powierzchniach strukturalnych, kontaktach gruntów neogenu i czwartorzędowych oraz na stropie głównego pokładu węgla brunatnego. Innymi podatnymi powierzchniami poślizgu były powierzchnie glaciektoniczne, ily zastoiskowe i ily o niekorzystnych parametrach wytrzymałościowych (Rybicki, 1996). Do badań osuwisk w KWB Bełchatów wykorzystywano sondowania CPTU. W tego typu badaniach osuwiska 20S, zlokalizowanego na zboczu południowym, w 1997 r. miał okazję uczestniczyć autor (Janecki, Bednarczyk, 1998; Janecki i in., 1999). Wykonane wtedy sondowania CPTU i pobrane później próbki NNS były wykorzystane do próby oceny parametrów wytrzymałościowych gruntów ilastych na podstawie korelacji testów *in situ* i badań laboratoryjnych w ramach programu NATO Advanced Fellowship w Instytucie Geotechniki Norwegian University of Science and Technology (Bednarczyk, Sandven, 2004). KWB Bełchatów posiada rozbudowany system monitoringu geotechnicznego obejmującego inklinometrię, czujniki naprężeń w górotworze, sejsmografię, repery geodezyjne i pomiary fotogrametryczne. Najważniejszymi elementami tego systemu na polu Bełchatów była sieć 22 inklinometrów, 4 – na zboczu

północnym, 12 – na zboczu południowym i 6 – na stoku zachodnim (Jończyk, Organiściak, 2010). Pomiary inklinometryczne są wykonywane w KWB Bełchatów od 1999 i dostarczyły wielu cennych danych, jednak niektóre z zainstalowanych inklinometrów zostały uszkodzone przez duże przemieszczenia wgłębne na głębokościach od kilku do ok. 10 m. W warunkach dużych wielkości przemieszczeń bardzo istotną rolę miały standardowe metody geodezyjne oraz pomiary fotogrametryczne. Zabezpieczenie zagrożonych rejonów polegało najczęściej na odciążeniu zagrożonych zboczy, zmniejszeniu kąta ich nachylenia lub wybraniu gruntów osuwiskowych przez koparki kołowe. Takie prace prowadzone były w zachodniej części pola Bełchatów na zboczach stałych południowym, północnym i zachodnim. Przykładowe prace wykonywane w ostatnich latach na zboczu południowym na osuwisku 24S obejmowały odciążenie i przesunięcie górnej części południowego stoku o ok. 60 m na południe na długości 1400 m poprzez zebranie i usunięcie 4 mln m³ nadkładu. Na zboczu stałym zachodnim dotychczasowe prace zabezpieczające obejmowały selektywne wybieranie węgla brunatnego w celu zniszczenia i zlikwidowania powierzchni poślizgu. Inna forma zabezpieczeń polegała na stopniowym podpierniu zbocza przez wewnętrzne zwałowisko nadkładu. Na zboczu północno-zachodnim prace stabilizacyjne obejmowały złagodzenie jego nachylenia przy użyciu koparek kołowych poprzez wybranie ok. 2 mln m³ nadkładu (Jończyk, Organiściak, 2010). Prace te wymagały wykonania kosztownych prac przygotowawczych, budowy nowych linii przenośników taśmowych, przebudowy linii energetycznych, przebudowy rurociągów i systemów odwadniania powierzchniowego oraz pozyskania dodatkowego terenu pod roboty ziemne na powierzchni terenu. Bardzo istotną rolę przywiązuje się w KWB Bełchatów do sporządzania planów ruchu koparek kołowych zawierających istotne informacje dotyczące warunków geologiczno-inżynierskich oraz pomiarów monitoringowych. W tym celu regularnie definiowano te warunki i określono graniczne wielkości przemieszczeń i odpowiadające im działania dotyczące zabezpieczenia infrastruktury górniczej i prowadzenia prac przeciwdziałających osuwiskom. Wielkości te wynoszą: prędkość początkowa 8–14 mm/dobę; prędkość ostrzegawcza do 20 mm/dobę; prędkość krytyczna 30 mm/dobę (Kurpiewska i in., 2013). W 2012 r. wykryto 32 strefy zagrożeń na zboczach – w kat. I (obejmuje rejon o największej skali zagrożenia, tj.: zagrożenia dla górnych krawędzi wyrobisk i infrastruktury poza wyrobiskiem, przerwaniem pracy taśmociągów węglowych, przerwaniem eksploatacji węgla na dłuższy czas), 6 – w kat. II (średniej skali zagrożenia dla ważnych obiektów odwodnienia powierzchniowego i wgłębne, związane z przerwaniem pracy taśmociągów nadkładowych, zasilania, komunikacji, okresowego wstrzymanie eksploatacji węgla) i 13 – w kat. III (rejon o małej skali zagrożenia, stanowiące utrudnienia dla ruchu zakładu górniczego). Od początku eksploatacji Pola Bełchatów na zboczu południowym powstawały duże osuwiska strukturalne wraz z postępem eksploatacji w kierunku zachodnim. W 2014 r. nastąpiła aktywacja dużego osuwiska znajdującego się ponad rejonem tzw. rowu drugiego rzędu charakteryzującego się naj-

większą miąższością węgla brunatnego, przy zboczu o wysokości ponad 300 m. Według danych przedstawionych na III Kongresie Górniczym we Wrocławiu w styczniu 2014 r. – 5 punktów wykazywało przemieszczenia > 30 mm/dziennie na poziomie –35/–50 m n.p.m. (Czarnecki, Organiściak, 2015). W czerwcu 2014 r. było to 15 punktów o przemieszczeniach > 30 mm/dziennie, 2 punkty > 100 mm, i 1 punkt > 200 m/dziennie. Według danych przedstawionych przez autorów przewidywano wówczas możliwość aktywacji bardzo dużego osuwiska o wysokości 240–320 m, długości 1,7 km, obejmującego całą szerokość zbocza południowego od granicy ze zwałowiskiem wewnętrznym do zachodniej granicy pola, przy nachyleniu zbocza od 1:3 do 1:4. Przemieszczenia obserwowane od maja 2015 do lutego 2018 r. były bardzo znaczne i wynosiły maksymalnie 573–884 mm/dobę (Cała i in., 2019). Całkowite przemieszczenia na osuwisku wynosiły 61–134 m, przy maksymalnym wypiętrzeniu 45 m. Te wielkoskalowe procesy doprowadziły także do wypiętrzenia węgla brunatnego znajdującego się na dnie odkrywki na wysokość kilku metrów. Dzięki wieloletniej praktyce, bardzo dobrej znajomości złoża, przeprofilowaniu nachylenia zbocza i częściowym podparciu zbocza zwałowiskiem wewnętrznym oraz zaprzestaniu eksploatacji węgla w głębszych częściach rowu drugiego rzędu udało się wydatnie zmniejszyć wielkość przemieszczeń (Cała i in., 2019). Miało to duże znaczenie dla bezpieczeństwa zakładu górniczego w związku z planowanym wkrótce zakończeniem eksploatacji na tym polu oraz późniejszą jego rekultywacją. Należy jednak podkreślić, że wielkość

osuwiska i przemieszczeń była bardzo duża i mogła spowodować duże straty materialne, a pełna stabilizacja tak dużego osuwiska jest w zasadzie możliwa tylko samoistnie.

Bardzo poważne zagrożenia osuwiskowe występowały także w odkrywce KWB Turów (eksploatacja do 2040 r.), na jej zewnętrznych i wewnętrznych składowiskach nadkładu (fig. 1). Zagrożenie dla stateczności zboczy stałych spowodowane było lokalizacją polskiej części złoża w bezpośrednim sąsiedztwie rzeki Nysy Łużyckiej na granicy z Niemcami (złóże zalega także pod Nysą Łużycką i po niemieckiej stronie). Eksploatacja prowadzona w bezpośrednim sąsiedztwie strefy o największej miąższości węgla brunatnego, w pobliżu filara ochronnego rzeki, na przełomie lat 1989 i 1990 spowodowała zagrożenie dla stateczności całego zbocza.

Strefa ochronna filara w latach 90. ubiegłego wieku miała szerokość 160–240 m, głębokość 100 m i ogólne nachylenie skarpy 19° (fig. 2). Do aktywacji przemieszczeń doprowadziły prace górnicze prowadzone w 1988 r. poniżej pierwszego pokładu węgla, w najgłębszej części kopalni, na głębokości 100 m (Milkowski, Kaczerewski, 2009). Pojawienie się pierwszych pęknięć w strefie filaru ochronnego wykryto w 1989 r. W tym czasie zauważono podniesienie się poziomu dna odkrywki w jej zachodniej części oraz pęknięcia na drodze do przejścia granicznego w Sieniawce. Bezpośrednią przyczyną powstania zagrożenia była eksploatacja węgla przy filarze na poziomie +124/140 m n.p.m. Innymi czynnikami sprzyjającymi powstaniu zagrożenia było konsekwentne nachylenie warstw, występowanie glin i zwietrzałych skał o niskich parametrach

wytrzymałościowych, procesy infiltracji i przesączania wód gruntowych, geometria zbocza, jego duża żywotność, zmiany stanu naprężeń w górotworze na skutek eksploatacji górniczej prowadzonej zbyt blisko strefy filara charakteryzującego się największą miąższością węgla. System monitoringu zagrożonego rejonu obejmował pomiary przemieszczeń powierzchniowych, inklinometrów, pomiary par punktów na szczelinach osuwiska, pomiary punktów geodezyjnych na zboczu, dnie kopalni oraz na powierzchni terenu po polskiej i niemieckiej stronie filara. Sieć pomiarowa składała się z 59 punktów. Wykonane badania wykazały obecność trzech powierzchni poślizgu zapadających pod kątem 5–20°, w kierunku dna odkrywki (fig. 3). Modelowanie numeryczne wykazało, że całe zbocze odkrywki we wszystkich przekrojach obliczeniowych, nie miało wystarczającej stateczności. Monitoring zarejestrował w listopadzie 1989 r. powierzchniowe przemieszczenia poziome do 100 mm (Milkowski, Kaczerewski,

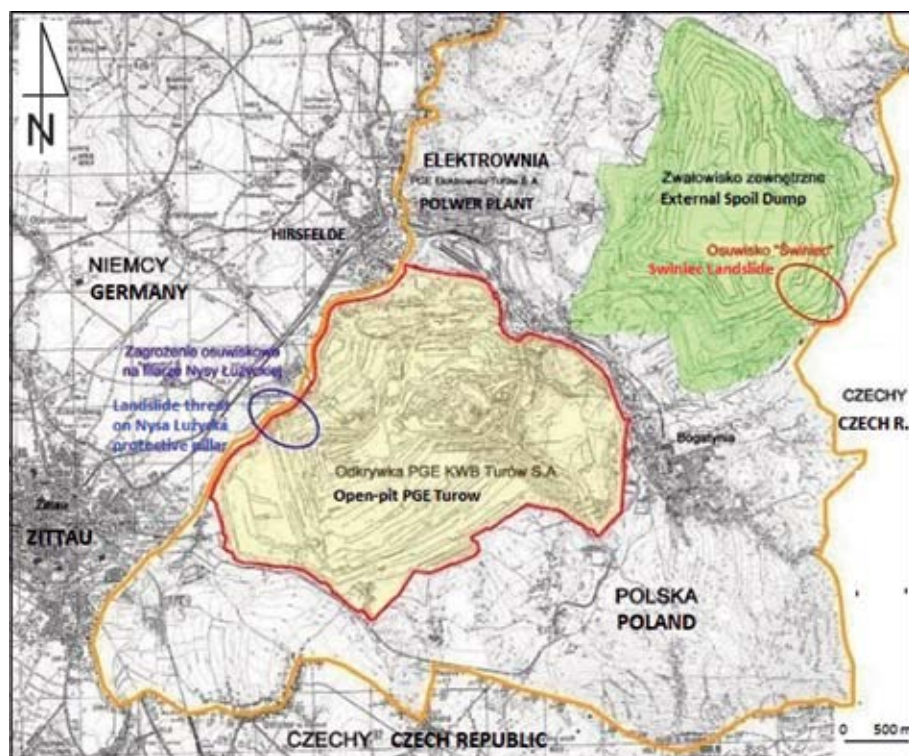


Fig. 1. Miejsca największych zagrożeń osuwiskowych w KWB Turów (Milkowski, Kaczerewski, 2009)

Location of the largest landslide threats in the Turów mine (Milkowski, Kaczerewski, 2009)

2009). Przemieszczenia pionowe, 70 mm w listopadzie 1989 r., zostały ograniczone do zera w lutym 1990 r. Do maja 1990 r. jedenaście serii pomiarów inklinometrycznych wykryło przemieszczenia 40–50 mm miesięcznie na głębokościach 53–70 m. Plan stabilizacji strefy filara zawierał wykonanie przypory z systemem odwodnienia podłoża na długości 560 m (Dmitruk, 1984). Obliczenia stateczności skarp, uwzględniające podparcie przez przyporę, wykazały wartości $F_s = 1,2–1,3$ gwarantujące stateczność zbocza. Zostało to potwierdzone późniejszymi pomiarami monitoringowymi. Przypora została uformowana w dwóch etapach: początkowym – 144 000 m³, drugi powstały do końca czerwca 1990 r. i obejmował 3,5 mln m³. Po ustabilizowaniu strefy zagrożeń kopalnia wdrożyła specjalny system monitoringu zagrożeń deformacji skarp oraz ciągły system monitoringu geotechnicznego i hydrogeologicznego. W celu zapobiegania przyszłym wypadkom tego typu zwiększono filar ochronny Nysy Łużyckiej. Przeprowadzone do tego czasu pomiary wykazały wystarczającą stabilność strefy filara. Pozwoliło to w 2010 r. na eksploatację węgla na głębokości 100–200 m poniżej naturalnego poziomu terenu. Było to możliwe także dzięki dodatkowemu zmniejszeniu kąta nachylenia zbocza do 10–12° (Milkowski, Kaczerewski, 2009).

Poważne zagrożenie naturalne w odkrywce KWB Turów wystąpiło także w 2010 r. W dniach 7–8 sierpnia 2010 r. po nawalnych opadach w polskich i czeskich Górach Izerskich, o sumach przekraczających 150 mm/m², doszło do przerwania obwałowań rzeki Miedzianki i nasypu kolejowego na długości 80 m, zalania odkrywki i przerwania tamy zbiornika w Niedowie, co doprowadziło także do znacznych strat po dojeździe fali powodziowej do Zgorzelca i Görlitz. W odkrywce KWB Turów doszło do przerwania systemu transportu przenośników taśmowych i zalania dwóch najniższych poziomów eksploatacyjnych i jednego zwałowego. Na spągu wyrobiska powstały dwa obszary zalewowe. W tym samym czasie istniało także poważne ryzyko zalania odkrywki

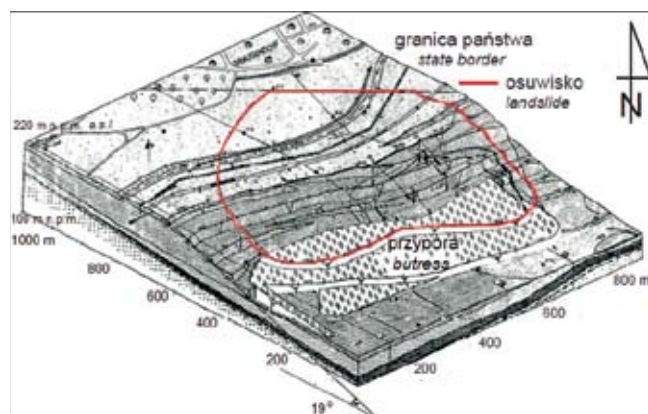


Fig. 2. Model osuwiska filara Nysy Łużyckiej z 1989 r. wraz ze stabilizacją przyporą (Milkowski, Kaczerewski, 2009)

Model of 1989 landslide on the Nysa Łużycka river protective pillar with support stabilization (Milkowski, Kaczerewski, 2009)

od strony Nysy Łużyckiej. Naprawa powstałych zniszczeń erozyjnych wymagała wielomiesięcznych prac rekultywacyjnych, wypompowania wody z kopalni oraz odbudowy zniszczonego zbiornika retencyjnego.

Zagrożenia osuwiskowe występowały także kilkakrotnie na wewnętrznym zwałowisku nadkładu, które uformowano po zamknięciu zwałowiska zewnętrznego. Uwidoczniły się one w miarę zwiększania objętości składowanych mas. Zagrożenia te uwidoczniły się 27 września 2016 r. w postaci groźnego osuwiska zwałowiska wewnętrznego. Przemieszczenia miały kierunek NNW–SSE, powierzchnia $2,5 \times 2,8$ km², kubatura ok. 100 mln m³. Osuwisko objęło wszystkie poziomy zwałowe od powierzchni terenu aż do dna odkrywki na głębokości ok. 200 m i spowodowało zniszczenie znacznej części układu zwałowania nadkładu. Przykrycie najniższej części odkrywki i częściowo węgla brunatnego gruntami zwałowymi

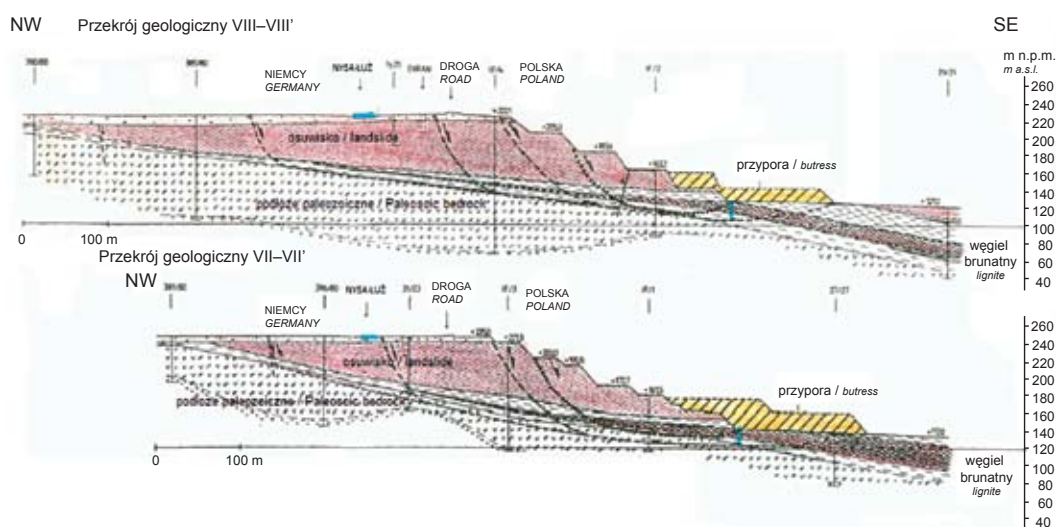


Fig. 3. KWB Turów, przekrój przez filar Nysy Łużyckiej z zaznaczonymi powierzchniami poślizgu z 1989 r. (Milkowski, Kaczerewski, 2009)

Turów Mine, cross-section crossing the Nysa Łużycka river protective pillar with indicated sliding surfaces in 1989 (Milkowski, Kaczerewski, 2009)

wymagało kosztownej rekultywacji i prac stabilizacyjnych umożliwiających prowadzenie dalszej eksploatacji (fig. 4). Najbardziej prawdopodobnymi przyczynami tego osuwiska, które objęło bardzo duże masy nadkładu, wydają się być zbyt duża wysokość i nachylenie skarp zwałowych. Wpływ na jego powstanie miały też prawdopodobnie niskie parametry składowanych gruntów zwałowych, głównie ilastych o niekorzystnych parametrach wytrzymałościowych, brak skutecznego odwodnienia podłoża zwałowiska oraz możliwa infiltracja wód z rejonu filara rzeki Nisy Łużyckiej.

Osuwiska na zwałowisku zewnętrznym nadkładu kopalni Turów były rejestrowane od początku jego istnienia od lat 60. ubiegłego wieku. Szczególnie uwidoczniły się w latach 90. zeszłego wieku ze względu na ogromną objętość czynnego zwałowiska wynosząca 1,7 mld m³. Jego duża wysokość, wynosząca 245 m, powodowała liczne problemy ze statecznością skarp. Powstałe w grudniu 1994 r. osuwisko Świniec o objętości 6 mln m³, miało ponad 1300 m długości, 750 m szerokości i występowało na powierzchni 68 ha (fig. 5–8). Wschodnia część zwałowiska znajdowała się ok. 150–300 m od granicy z Republiką Czeską. Główną przyczyną powstałych zagrożeń było składowanie dużych mas nadkładu w trudnych warunkach geotechnicznych, przykrycie przez zwałowisko obszarów źródłiskowych cieków oraz nieefektywne odwadnianie warstw podłoża zbudowanych z czwartorzędowych lessopodobnych glin charakteryzujących się niekorzystnymi parametrami wytrzymałościowymi na początku lat 70. ubiegłego wieku podczas budowy zwałowiska. Bezpośrednią przyczyną przemieszczeń było znaczne podwyższenie poziomu zwałowiska do rzędnych od 370 do 415 m n.p.m. w jego części południowo-wschodniej i formowanie bardzo wysokich skarp zwałowych, osiągających w niektórych przypadkach do 70 m. Dodatkowym czynnikiem były niekorzystne parametry geologiczno-inżynierskie gruntów ilastych transportowanych przenośnikami taśmowymi na odległość ponad 15 km, co skutkowało pogorszeniem ich parametrów wytrzymałościowych oraz częściowym upłyn-

nieniem. Awaria jednej ze zwałowarek, spowodowała obciążenie zagrożonego rejonu poprzez czasowe skierowanie tam większych niż pierwotnie planowano mas nadkładu. Pierwsze przemieszczenia o wielkości 0,5 m zaobserwowano 7 grudnia na poziomie + 415 m n.p.m. W kolejnych dniach przemieszczenia zwiększyły się do 25 m dziennie między 10–12 grudnia 1994 r., a jezior osuwiska znajdował się 70 m od granicy z Republiką Czeską (Milkowski, Kaczerewski, 2009). Całkowite przemieszczenia osiągnęły 170 m w górnej części osuwiska i 92 m na jego czole. Ogólne nachylenie zbocza osuwiska wynosiło 6°. Rekultywacja obejmowała zabezpieczenie osuwiska poprzez jego drenaż i ratunkowe prace stabilizacyjne. Ze względu na wielkość mas osuwiskowych, możliwości przeciwdziałania były jednak ograniczone. Prace stabilizacyjne prowadzone były nieprzerwanie przez 24 godziny na dobę do 30 grudnia 1994 r. Ściana oporowa o długości 343 m, zbudowana z elementów stalowych typu Larssen, została wbita w ziemię na głębokość 5,5–14 m (Dmitruk, 1995). Wykonano trzy otwory wiertnicze umożliwiające odprowadzenie wód gruntowych z warstw kontaktowych podłoża osuwiska, w których pompy pracowały 24 godziny na dobę. Pomiary przemieszczeń powierzchniowych wykonywano codziennie. Sieć monitoringu zlokalizowana była na powierzchni osuwiska i w jego otoczeniu. Uzyskane dane wykorzystano dla stworzenia cyfrowej mapy przemieszczeń. Przemieszczenia były bardzo duże i wahały się do 13 grudnia 1994 r. 5–22 m dziennie. Czoło osuwiska przesuwało się w kierunku granicy z Republiką Czeską. Nowo wybudowany mur oporowy został częściowo zniszczony 22 grudnia. W celu jego wzmocnienia zbudowano dziesięć specjalnych konstrukcji nośnych z żelbetonu. Jednocześnie podparto i naprawiono inne części muru oporowego. Prace te zakończyły się sukcesem i 2 stycznia 1994 r. nie odnotowano już przemieszczeń.

Dodatkowe prace stabilizacyjne obejmowały rekultywację powierzchni osuwiska, wymianę gruntu, wykonanie drenażu powierzchniowego, zalesienie 17 km² (zasadzono

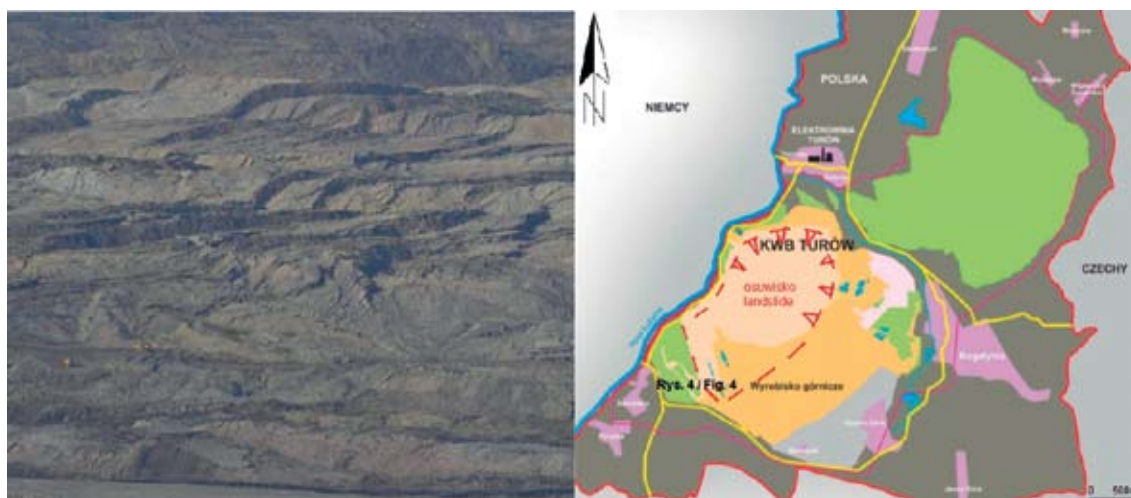


Fig. 4. Osuwisko na zwałowisku wewnętrznym KWB Turów, 2016 (zdjęcie – Radio Wrocław)

Internal spoil dump landslide in the Turów Mine, 2016 (photo – Radio Wrocław)

2 mln drzew). Na zwałowisku zbudowano nowy system monitoringu, który obejmował inklinometry, piezometry, mierniki ciśnienia porowego i naziemne skanowanie laserowe (Janecki i in., 1995; Janecki i in., 1996a). Pomiary te uzupełniono sondowaniami CPTU (Janecki i in., 1996b; Janecki, Bednarczyk, 1998) połączonymi z pobieraniem prób gruntów o nienaruszonej strukturze i badaniami laboratoryjnymi parametrów wytrzymałościowych gruntów zwałowych (Borecka 2007a, Borecka 2007b). W trakcie badań osuwiska Świniec wykonywano codziennie mapy przemieszczeń, które dostarczano do działu geologicznego kopalni.

PRAKTYCZNE ZASTOSOWANIE ZDALNEGO MONITORINGU W KWB BĘLCHATÓW

Możliwości zastosowania zdalnych metod monitoringu osuwisk przetestowano w ramach projektu UE Slopes na złożu KWB Bełchatów. Cechuje się ono złożoną budową geologiczną, związaną z występowaniem w głębokim rowie tektonicznym Kleszczowa (fig. 9–10). Neogeńska struktura tektoniczna powstała w skałach mezozoicznych charakteryzuje się występowaniem aktywnych naprężeń tektonicznych. Podłoże mezozoiczne reprezentują zwietrzałe wapienie, margle jurajskie oraz kredowe rozdzielone wzdłuż powierzchni uskoku i fałdów z rozwiniętymi procesami krasowymi. Eksploatacja prowadzona jest w dwóch odkrywkach Bełchatów i Szczerców oddzielonych przez wysad solny Dębiny. Grubość osadów neogenu w obrębie rowu wynosząca ok. 150–310 m, jest ok. 5–15 razy większa niż na zewnątrz (Ciuk, Piwocki, 1980). Grubość głównego pokładu węgla brunatnego waha się w granicach 20–60 m. Zachodnia granica Pola Bełchatów, gdzie zlokalizowano system zdalnego monitoringu znajduje się w pobliżu wysadu solnego Dębiny. Wysad ten wraz z uskokami wpływa na stan naprężeń w górotworze. Duża głębokość eksploatacji, ponad 300 m, oraz



Fig. 5. Widok na osuwisko Świniec, na zwałowisku zewnętrznym KWB Turów z poziomu +415 m n.p.m., grudzień 1994, lokalizacja na figurze 7

Świniec landslide, view from the Turów Mine external spoil dump +415 m a.s.l. operating level, Dec 1994, for location see Figure 7



Fig. 6. Osuwisko Świniec, poziom +415 m n.p.m., grudzień 1994, lokalizacja na figurze 7

Świniec landslide, level +415 m a.s.l., Dec 1994, for location see Figure 7

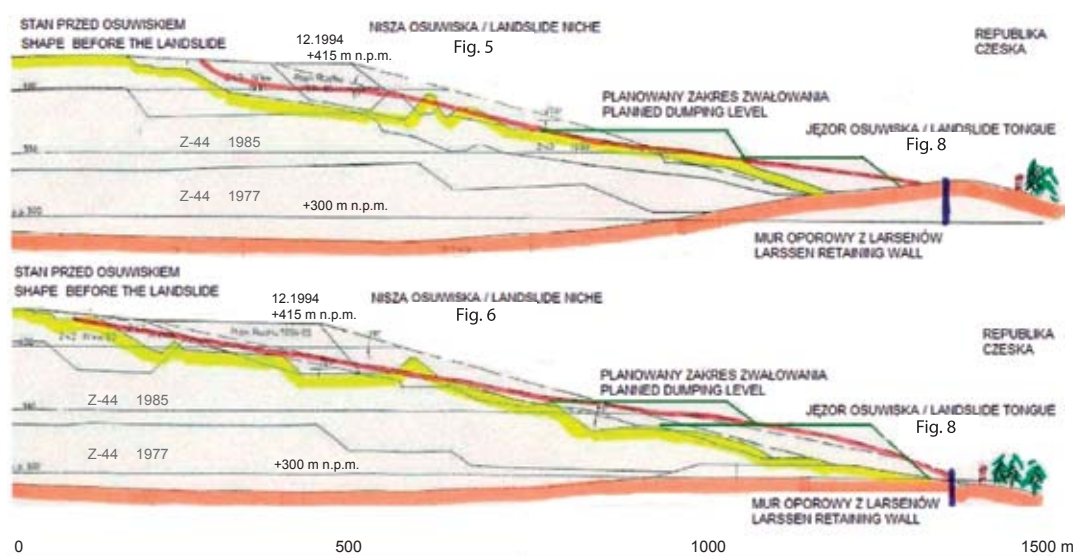


Fig. 7. Przekroje przez osuwisko Świniec, grudzień 1994 (Milkowski, Kaczerewski, 2009)

Cross-sections across the Świniec landslide, Dec 1994 (Milkowski, Kaczerewski, 2009)



Fig. 8. Część czołowa jęzora osuwiska Świniec w 1994 r. (Milkowski, Kaczerewski, 2009), lokalizacja na figurze 7

Head part of the Świniec landslide in the external spoil dump of the Turów Mine in 1994 (Milkowski, Kaczerewski, 2009), for location see Figure 7

niekorzystne parametry gruntów ilastych występujących na zboczach często aktywuje procesy osuwiskowe. Na zboczu zachodnim większość osuwisk występuje na powierzchniach strukturalnych, ponad i w obrębie głównego pokładu węgla. Na zboczu południowym osuwiska występują w pobliżu głębokiej struktury tektonicznej tzw. rowu drugiego rzędu o największej grubości węgla brunatnego. Na podstawie wcześniejszych obserwacji terenowych i monitoringowych stwierdzono, że przemieszczenia w kierunku wyrobiska występowały na stropie kompleksu węglowego (Czarnecki i in., 2010). Zaobserwowano także przemieszczenia pokładu

węgla brunatnego w kierunku wyrobiska. Lokalizacja miejsca instalacji systemu została wytypowana wspólnie z KWB Bełchatów. Był to obszar, który nie był wcześniej objęty monitoringiem inklinometrycznym na poziomie +42 m n.p.m., gdzie charakter występujących zagrożeń i przewidywana wielkość przemieszczeń wydawała się najbardziej odpowiednia dla tego typu monitoringu (fig. 11).

WYNIKI TERENOWYCH I LABORATORYJNYCH BADAŃ GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKICH

Wykonane przez Poltegor-Institut badania obejmowały opis otworu rdzeniowego 132 mm, pobranie 31 próbek gruntów klasy A oraz instalację systemu monitoringu on-line. Otwór wiertniczy zlokalizowany był w strefie zagrożeń IVW przyległej od NE do wysadu solnego. Analiza uziarnienia wykazała, że badane grunty reprezentują gliny piaszczyste, ły i piaski gliniaste o najwyższej wilgotności naturalnej w piaskach gliniastych – 32,8% a niskiej w piaskach 13,6–16,3%. Zawartość części organicznych była bardzo wysoka i wynosiła 3–19,3%. Gęstość objętościowa wahała się od 1,64 g/cm³ – dla gliny piaszczystej i do 2,29 g/cm³ – dla piasku gliniastego. Stopień plastyczności IL wynosił 0,17 dla gliny piaszczystej, najwyższą wartość 0,41 osiągając w przypadku łu piaszczystego. Badania w aparacie bezpośredniego ścinania wykazały wartości spójności dla glin piaszczystych wynoszące 19,5 kPa i kąt tarcia 22,8°. Badania ścisłości wykazały moduły edometryczne ścisłości pierwotnej i wtórnej wynoszące odpowiednio Mo = 1,74 MPa M = 8,4 MPa. Badania CIU i CID w aparacie trójosiowym 30 próbek gruntów (13 testów) wykonywano ze wstępną konsolidacją i saturacją próbek (z kontrolą parametru ciśnienia porowego B). Próbkę tych samych gruntów ścinano przy rosnących ciśnieniach w komo-

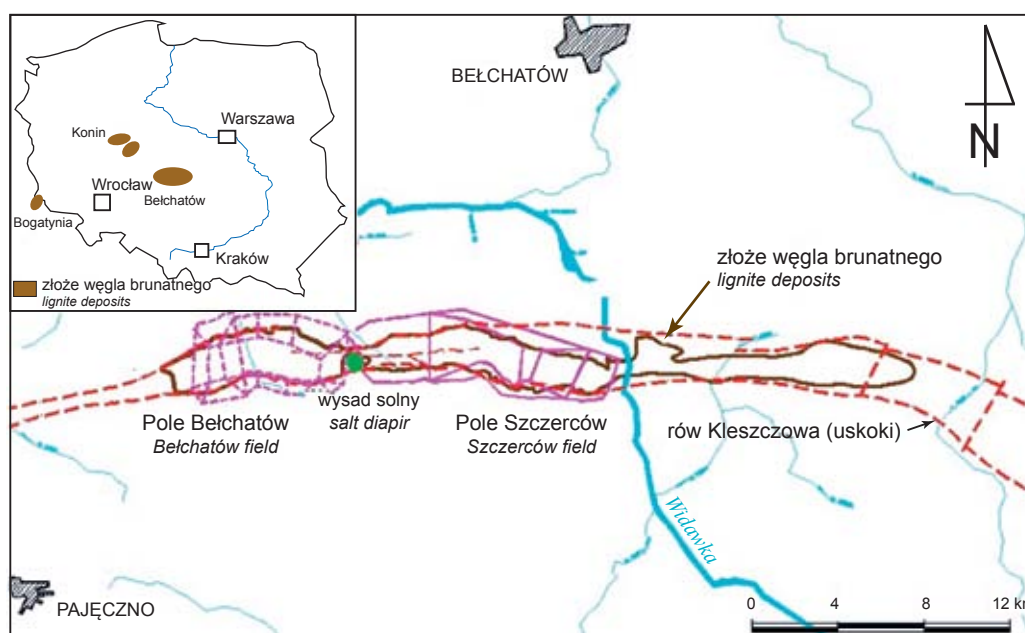


Fig. 9. Lokalizacja KWB Bełchatów

Location of the Belchatów Mine

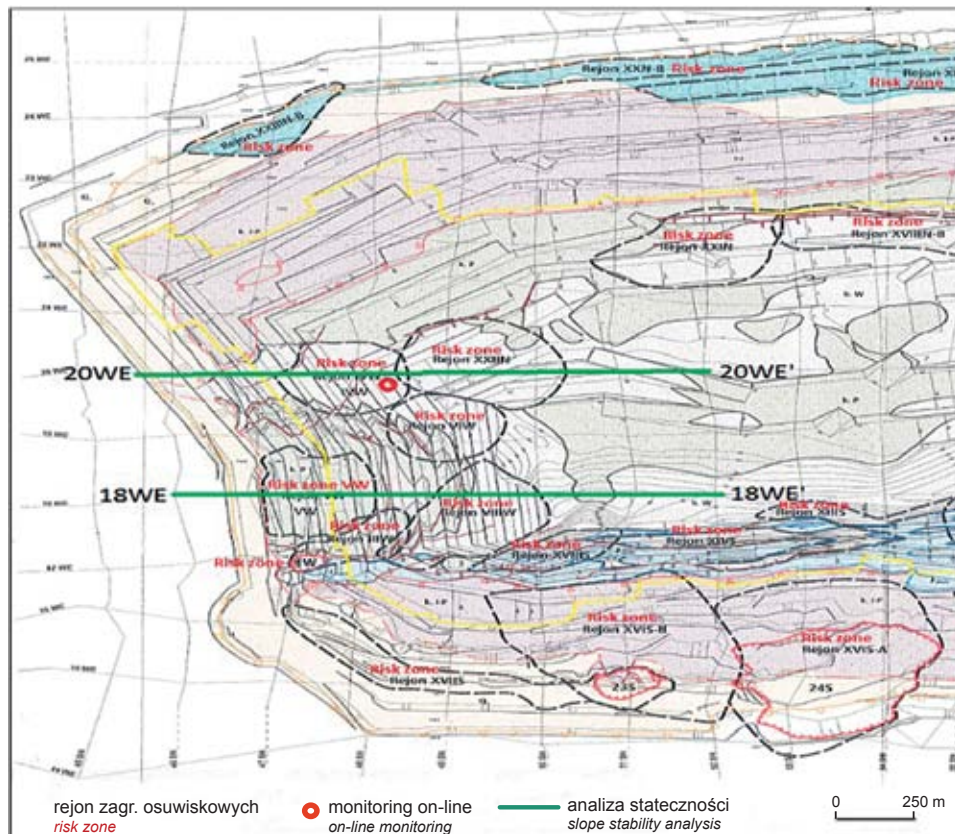


Fig. 10. Lokalizacja rejonu badań w KWB Belchatów w ramach projektu Slopes

Location of Slopes project investigated area in the Belchatów Mine

rze aparatu trójosiowego a do interpretacji wyników wykorzystano kryterium Coulomba-Mohra. Wykonywanie testów utrudniało jednak silne przekonsolidowanie gruntów i występowanie ostrych fragmentów lignitu, co utrudniało formowanie próbek do testów. Badania wykazały bardzo zmienne wielkości parametrów wytrzymałościowych (tabela 1). Najmniej korzystnymi parametrami cechowały się grunty spiste łąy, łąy pylaste i gliny. Najniższymi wartościami efektywnymi kąta tarcia wewnętrznego i spójności $\phi^* = 9,8^\circ$ i $c^* = 17,7$ kPa cechowały się łąy poniżej głównego pokładu węgla na głębokości 46 m, co odpowiadało w przybliżeniu wykrytej przez system monitoringu powierzchni poślizgu.

DANE TECHNICZNE ZDALNEGO SYSTEM MONITORINGU *IN SITU*

System zdalnego monitoringu *in situ* zainstalowano w północno-zachodniej części zbocza zachodniego Pola Belchatów na poziomie +42 m n.p.m. Głębokość instalacji wynosiła 100 m, co pozwala rejestrować przemieszczenia do poziomu -58 m n.p.m. System posiada specjalne sztywne segmenty pomiarowe o długości 0,5 m połączone ruchomymi przegubami. Mogą przemieszczać się w dowolnym kierunku, lecz są zabezpieczone przed skręcaniem. System składa się z 200 czujników przemieszczeń, 3 magnetometrów oraz

czujnika ciśnienia porowego w gruncie na głębokości 30 m (fig. 12–14). Każdy segment zawiera 3 czujniki w zakresie pomiarowym 45° , przy dokładności pomiaru 0,02 mm/m. Czujnik temperatury gruntu umiejscowiony jest w co 4 segmenty. Rejestrator i system transmisji danych GPRS, zasilany przez panel słoneczny, umożliwia zdalny dostęp on-line do rejestratora przez Internet. Zadana częstotliwość pomiarów wynosi 6 godzin i są one wykonywane w sposób ciągły od 19 grudnia 2016 r. do chwili obecnej.



Fig. 11. Zdalny system monitoringu, Pole Belchatów

Remote monitoring system in the Belchatów Mine

Tabela 1

Zestawienie wyników badań trójosioowych

Results of triaxial tests

Badanie nr Test No	Rodzaj gruntu Soil type	Głęb. w otworze Depth in the borehole [m]	Metoda badania Test method	Parametry wytrzymałościowe Strength parameters			
				kąt tarcia wewnętrznego friction angle		spójność cohesion	
				ϕ	ϕ'	c	c'
				[°]	[°]	[kPa]	[kPa]
1	piasek glin./głina piaszczysta	4,0	CIU	42,87	42,98	0,00	0,00
2	pył piaszczysty	16,0	CIU	33,51	34,13	27,75	19,66
3	głina	29,0	CIU	11,37	14,53	66,26	103,20
4	ił pylasty	33,0	CIU	21,83	30,29	129,17	32,53
5	węgiel brunatny	33,5	CID		19,00		200,00
6	ił	46,0	CIU	8,54	9,85	6,31	18,71
7	piasek gliniasty	46,5	CIU	55,13	28,64	0,00	0,00
8	ił	50,0	CIU	12,96	15,50	373,03	345,11
9	piasek gliniasty	57,0	CIU	29,08	28,40	0,00	0,00
10	pył piaszczysty	81,0	CIU	35,35	34,97	32,32	41,22
11	pył piaszczysty	81,5	CID	32,35	32,40	154,88	153,60

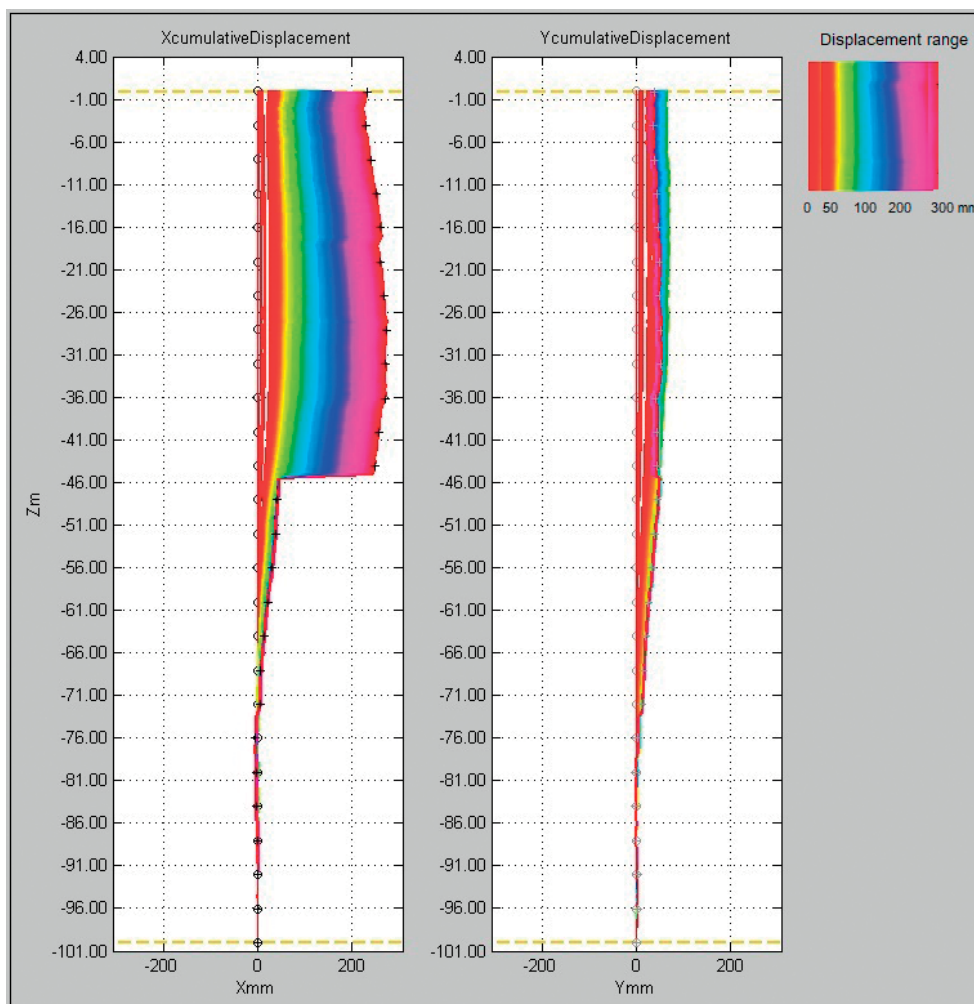


Fig. 12. Skumulowane przemieszczenia wgłębne

Cumulated ground displacements

WYNIKI ZDALNEGO MONITORINGU *IN SITU*

Dane zarejestrowane przez pierwsze 28 miesięcy, w czasie trwania projektu UE Slopes tj. od 20.12.2016 (moment instalacji sprzętu) do 20.05.2018, wykazały, że największe przemieszczenia w kierunku x (nachylenia stoku) wyniosły 228 mm, a w kierunku y (prostopadły) – 60 mm (fig. 12).

Największe naprężenia ścinające w kierunku nachylenia stoku x zanotowano na głębokościach 0–45 m, a w kierunku y (prostopadłym) na głębokości 15 m (fig. 12, 14). Po zakończeniu projektu UE Slopes pomiary są kontynuowane. Całkowity wypadkowy wektor przemieszczeń do 27.05.2019 wyniósł 275 mm. Największe wielkości przemieszczeń wy-

noszące 80 mm zaobserwowano w okresie czerwiec–lipiec 2018 r. Duże wartości przemieszczeń występowały także w lutym 2017 r. – 60 mm, sierpniu–wrześniu 2017 r. – 35 mm i lutym–kwietniu 2019 r., kiedy zwiększyły się o 50 mm. Ich kierunek początkowo ku północnemu wschodowi, następnie był w przybliżeniu zgodny z nachyleniem zbocza w ku wschodowi. Wartość początkowa ciśnienia porowego, wynosząca 258 kPa na głębokości 30 m, zmniejszyła się po 2,5 roku do 28 kPa (fig. 13). Tak duży spadek wartości ciśnienia porowego był prawdopodobnie związany z eksploatacją węgla brunatnego prowadzoną na niż leżących poziomach odkrywki i działaniem systemu odwodnienia kopalnianego. Przemieszczenia w głębszych warstwach

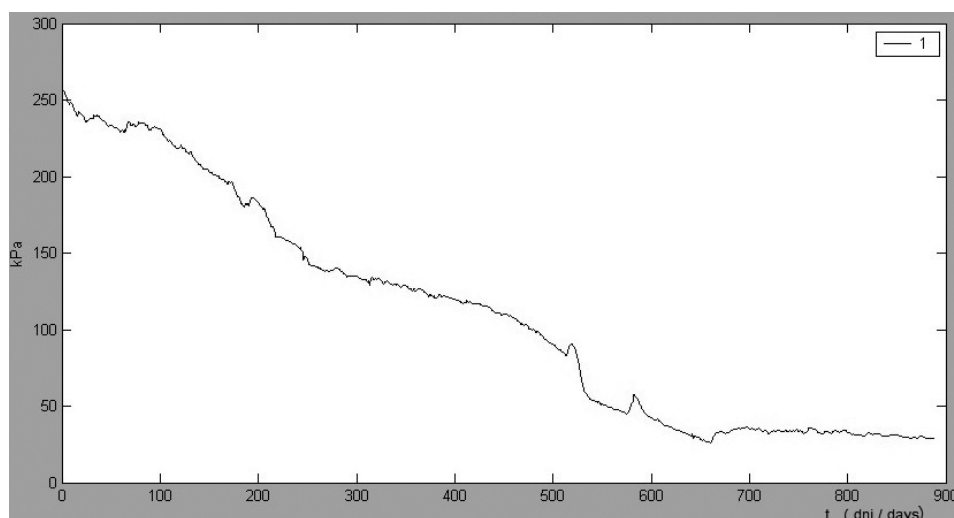


Fig. 13. Ciśnienie porowe na głębokości 30 m (poniżej poziomu +42 m n.p.m.)

Pore pressure at 30 m depth (below level +42 m a.s.l.)

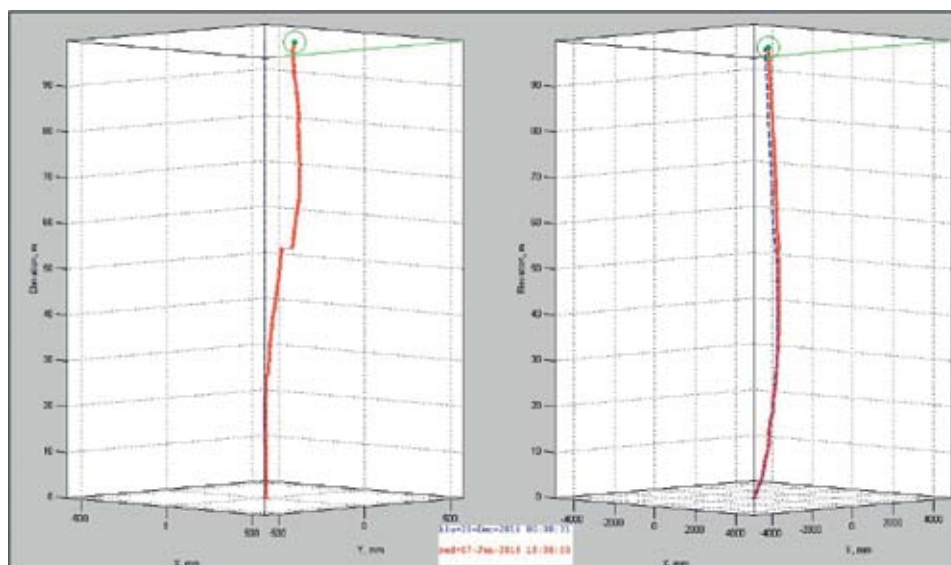


Fig. 14. Model 3D przemieszczeń wglębnych, grudzień 2016–czerwiec 2018

3D model of ground displacements. December 2016–June 2018

podłoża spowodowane były złożonymi czynnikami, w tym zmianami stanu naprężeń w górotworze, oraz uruchomieniem zwałowania nadkładu w wyższych częściach zbocza zachodniego. Wpływ na wielkość przemieszczeń miała też obecność wysadu solnego i naprężenie jakie mógł on wywierać na sąsiadujące warstwy. Wszystkie te czynniki zmieniły stan naprężeń w górotworze i sprzyjały aktywacji przemieszczeń w głębszych.

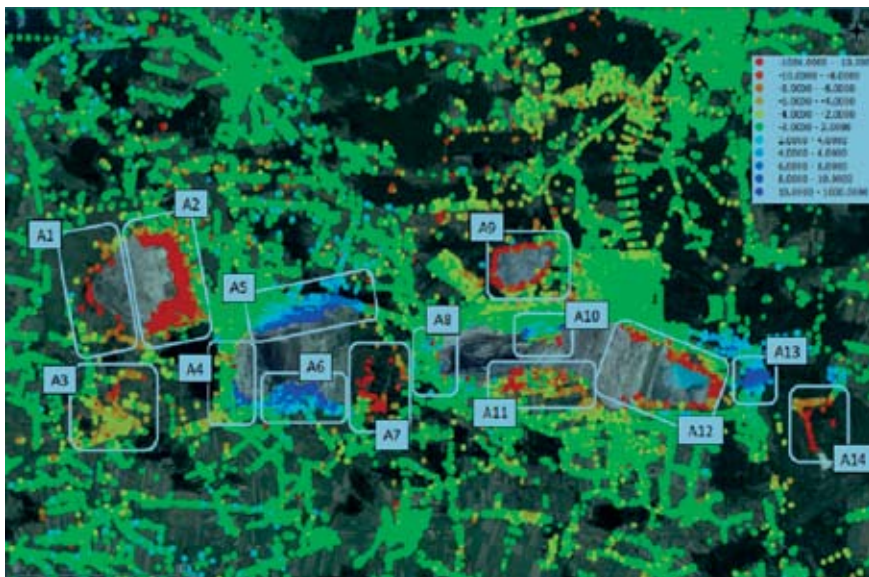


Fig. 15. Wyniki satelitarnej interferometrii radarowej (PSI), (Marshall i in., 2019)

Results of (PSI) Persistent Scatterer Interferometry (Marshall *et al.*, 2019)



Fig. 16. Pomiary LiDAR UAV na poziomie +42 m n.p.m., Pole Belchatów (Marshall i in., 2019)

LiDAR UAV scanning results at level +42 m a.s.l, Belchatów Field (Marshall *et al.*, 2019)

INNE ZDALNE METODY MONITORINGU

Inne nowoczesne metody zdalnego monitoringu, takie jak satelitarne skanowanie radarowe PSI (*Persistent Scatter Interferometry*) w wysokiej rozdzielczości, naziemne skanowanie laserowe i skanowanie LiDAR z użyciem drona zostały praktycznie przetestowane w ramach projektu Slopes w KWB Belchatów. Satelitarne skanowanie radarowe w wysokiej roz-

dzielczości z satelitów CosmoSkyMed (dokładność 5–10 mm) było wykonywane przez firmę GAP (spółka Technical University Bari, Włochy) a wyniki zamawiane i analizowane przez Poltegor-Instytut we współpracy z GAP. Łącznie w latach 2016–2018 wykonano 50 obrazów radarowych o wysokiej rozdzielczości w kwadracie 40 × 40 km. Na podstawie wykonanych zdjęć zidentyfikowano 781206 punktów, dla których określono wielkości przemieszczeń. Ogółem wydzielono 18 stref charakteryzujących się zwiększonymi przemieszczeniami na zewnętrznym zwałowisku nadkładu w Szczercowie oraz w szeregu innych rejonów obejmujących zbocza odkrywek Belchatów i Szczerców. Największe osiadania do 60 mm/rok wykryto na zboczu wschodnim zewnętrznego zwałowiska nadkładu w Szczercowie (fig. 15). Na zboczu zachodnim tego zwałowiska osiadania wynosiły 30–40 mm/rok. Na północnych i południowych zboczach odkrywki Pola Szczerców przemieszczenia wynosiły 30–40 mm/rok. W rejonie południowego zbocza Pola Belchatów stwierdzone przemieszczenia (możliwych do porównania punktów) wynosiły 19–24 mm/rok natomiast w badanym rejonie zbocza zachodniego od 9,5–10 mm/rok. Pomiary te umożliwiły bardzo szczegółową analizę przemieszczeń na dużym obszarze. Należy zaznaczyć jednak, że metoda pozwala badać przemieszczenia inicjujące większe osuwiska i początkowy ich rozwój. Ma jednak też ograniczenia związane z miejscami gdzie morfologia zmienia się bardzo szybko i nie pozwala na porównanie tych samych elementów terenu. Jest tak w miejscach gdzie przemieszczenia i zmiany powierzchni terenu są bardzo duże i mogą wynosić np. do 1000 mm/dzień, np. dla nowo składowanych gruntów zwałowych (przy bardzo szybko zmieniającej się morfologii zwałowiska otrzymujemy w takich miejsca

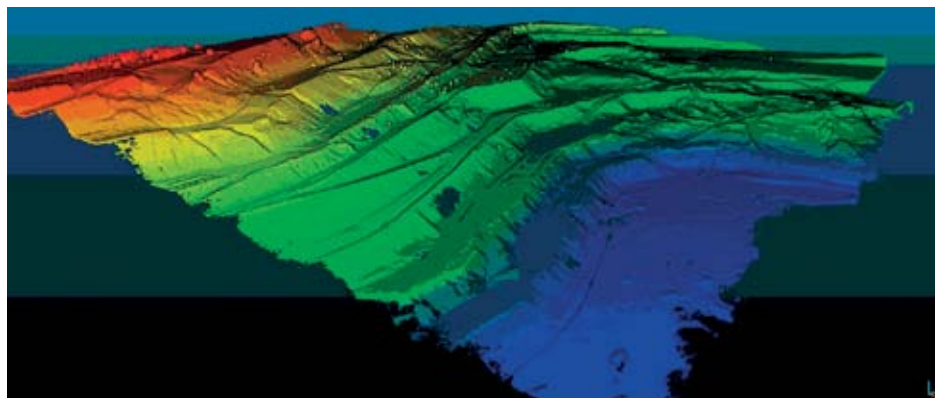


Fig. 17. Dane ze skanowania LiDAR UAV w postaci 8-kolorej chmury punktów (Marshall i in., 2019)

UAV LiDAR scanning data as an 8-colour point cloud (Marshall *et al.*, 2019)

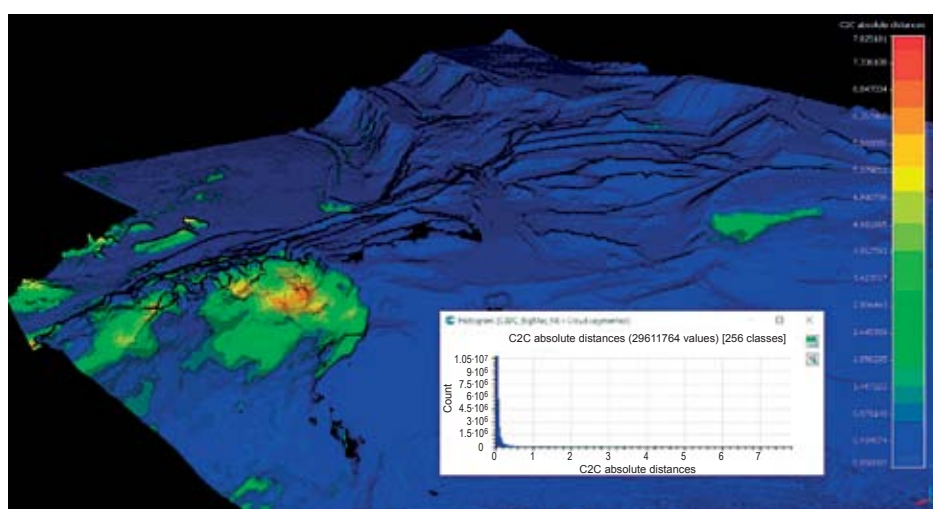


Fig. 18. Porównanie pomiarów LiDAR UAV z fotogrametrią lotniczą, przemieszczenia po 3 miesiącach, listopad 2016–marzec 2017 (Marshall i in., 2019)

Comparison of LiDAR UAV scanning with the aerial photogrammetry after three months, November 2016–March 2017 (Marshall *et al.*, 2019)

brak danych, biały kolor na zdjęciach). Podobna sytuacja braku danych ma miejsce na bardzo aktywnych osuwiskach o dużych przemieszczeniach przy szybko zmieniającej się morfologii terenu (np. dla osuwiska na południowym zboczu Pola Bełchatów pomimo przemieszczeń). W takich przypadkach konieczne jest trwałe zamontowanie na takich powierzchniach reflektorów, które umożliwiają pomiar w tych punktach (aż do czasu ich ewentualnego zniszczenia).

Duże możliwości monitoringu osuwiska posiadają systemy skaningu lotniczego i UAV. Umożliwiają one szybkie pozyskiwanie różnorodnych danych monitoringowych także w warunkach dużych przemieszczeń. Dane w postaci chmur punktów mogą być wykorzystane do określenia takich parametrów jak zaleganie warstw w obrębie zboczy, przemieszczenia powierzchniowe, lokalizacja struktur geologicznych w tym tektonicznych, takich jak np. uskoki i powierzchnie nieciągłości. W projekcie Slopes tego typu pomiary wykorzystywano do budowy numerycznego mo-

delu terenu przez Ineris (Francja). Pomiary LiDAR UAV z wykorzystaniem skanera firmy YellowScan wykonywano na zachodnim zboczu KWB Bełchatów (fig. 16–18). Zrealizowano je w październiku i listopadzie 2016 r. Do analizy przemieszczeń na zboczu zachodnim wykorzystano także lotnicze pomiary LiDAR z marca 2017 r. Dla kalibracji wyników wykorzystano 11 naziemnych punktów kontrolnych GCP. Wytworzona chmura punktów o gęstości 250–300 pkt/m², obejmowała ponad 29,6 mln punktów. Poniżej przedstawiono wyniki skanowania LiDAR z drona i zdjęć lotniczych pomiędzy listopadem 2016 a marcem 2017 r. (fig. 18). Wyniki wskazują na występowanie przemieszczeń oraz powierzchni nieciągłości na zboczu zachodnim Pola Bełchatów. Aby potwierdzić i ocenić wielkość występujących przemieszczeń, w programie CloudCompare porównano wyniki kolejnych pomiarów. Wskazują one wyraźnie na występowanie przemieszczeń na zboczu zachodnim. Obszary podlegające przemieszczeniom zaznaczono na



Fig. 19. Interpretacja parametrów zboczy na podstawie skanowania laserowego TLS (Marshall i in., 2019)

Interpretation of slope parameters based on TLS laser scanning (Marshall *et al.*, 2019)

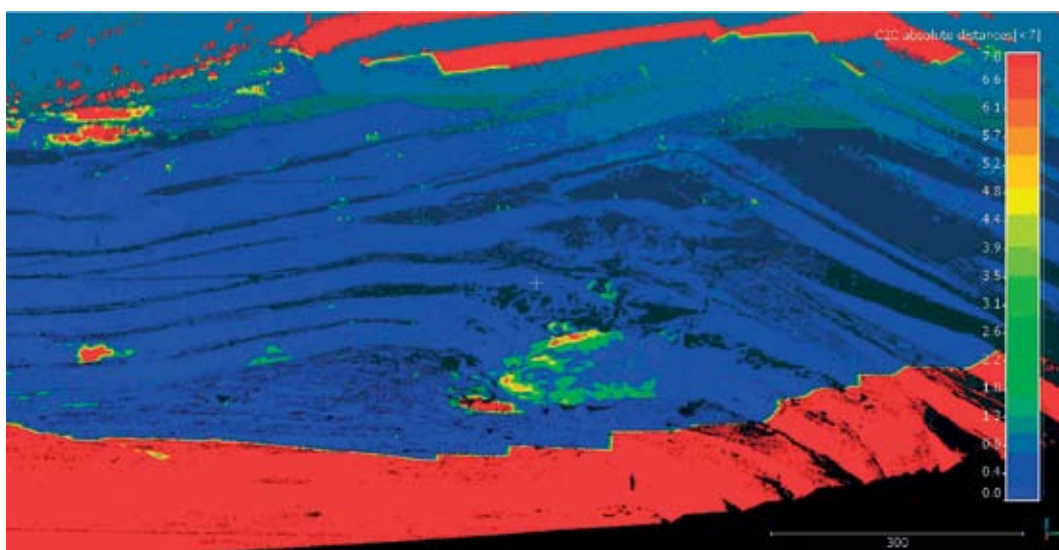


Fig. 20. Porównanie naziemnego skaningu laserowego TLS ze zdjęciem lotniczym, czerwiec 2016–marzec 2017 (Marshall i in., 2019)

Comparison of TLS terrestrial laser scanning and aerial photogrammetry, June 2016–March 2017 (Marshall *et al.*, 2019)

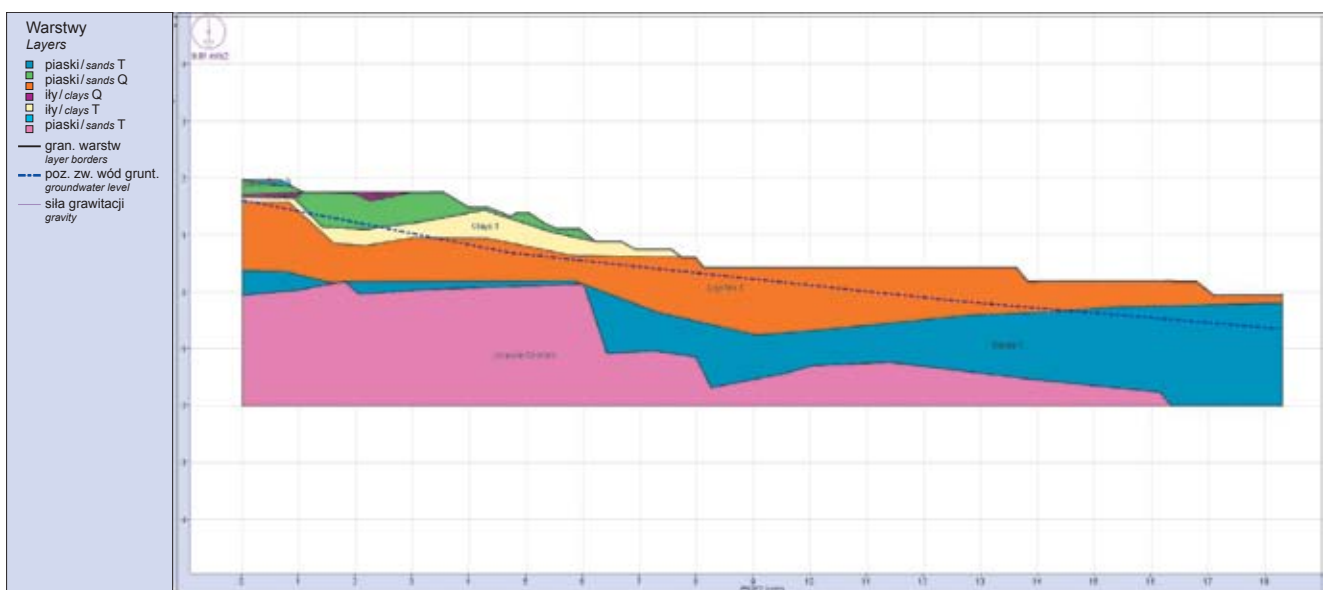


Fig. 21. Analiza stateczności, 20WE, wybrane warstwy geotechniczne

Slope stability analysis, 20WE, selected geotechnical layers

figurze 19 kolorami od zielonego do czerwonego wraz z odpowiadającymi im wielkościami przemieszczeń oszacowanymi do ok. 6 mm. Otrzymane wyniki wyraźnie identyfikują kilka obszarów przemieszczeń w tym osuwisko znajdujące się w północnej części zbocza zachodniego w pobliżu punktu monitoringu *in situ* na poziomie +42 m n.p.m.

Inne pomiary, wykonywane w ramach projektu, obejmowały naziemne skanowanie laserowe zbocza zachodniego Pola Bełchatów. Wykonane ono zostało w czerwcu 2016 r. przez Wydział Górniczy Uniwersytetu Exeter (UK) przy użyciu lasera Rigel-VZ4000 z 4 lokalizacji położonych na południowym zboczu Pola Bełchatów i dwóch na zboczu północnym. Pomiary te zostały wykorzystane do stworzenia

numerycznego modelu terenu. Wyniki skanowania wykorzystano także do identyfikacji kąta nachylenia zboczy i kierunku geograficznego ich nachylenia z wykorzystaniem programu ArcGIS. Wyniki tych analiz, przedstawione na figurze 19, wskazują że kąt nachylenia poszczególnych skarp zbocza wynosi od kilkunastu do ok. 70°. W celu identyfikacji stref osuwiskowych wyniki naziemnego skanowania laserowego TLS zostały także porównane z wynikami późniejszego skanowania LiDAR UAV z listopada 2016 r. i fotogrametrią lotniczą z marca 2017 r. (fig. 20–21). Na wykonanych modelach wyraźnie uwidaczniają się strefy w kolorach czerwonym i zielonym reprezentujące największe przemieszczenia na niebieskim tle reprezentującym stabilne obszary.

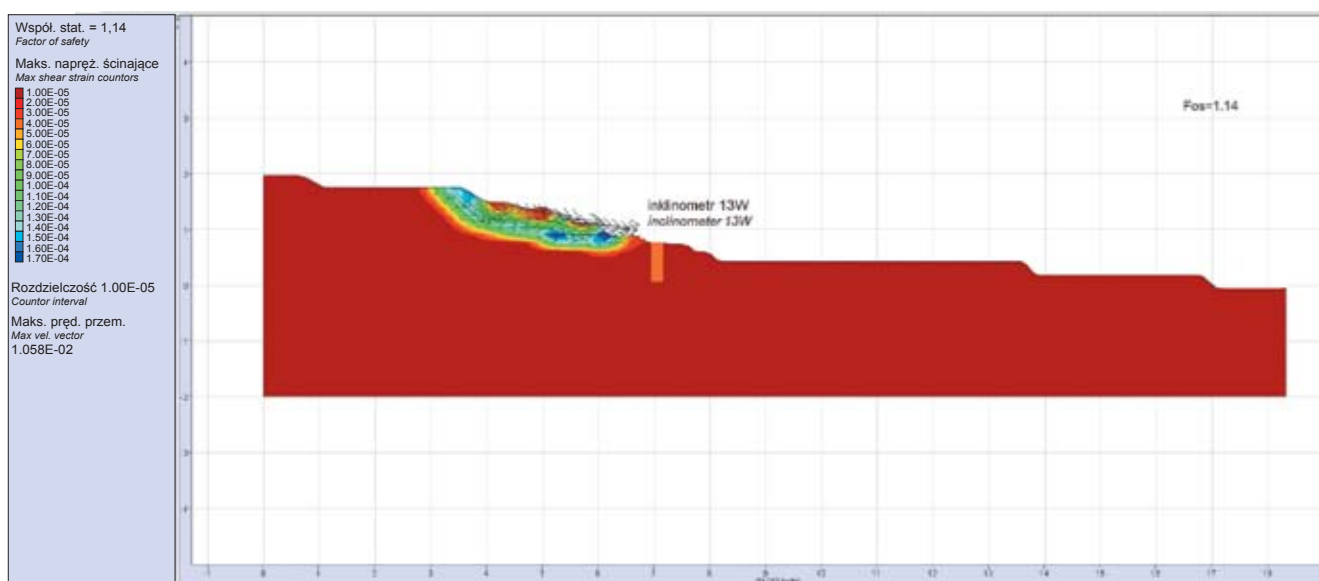


Fig. 22. Analiza stateczności zbocza, 18WE, metoda SSR, Fos = 1,14

Slope stability analysis, 18WE, SSR method, Fos = 1.14

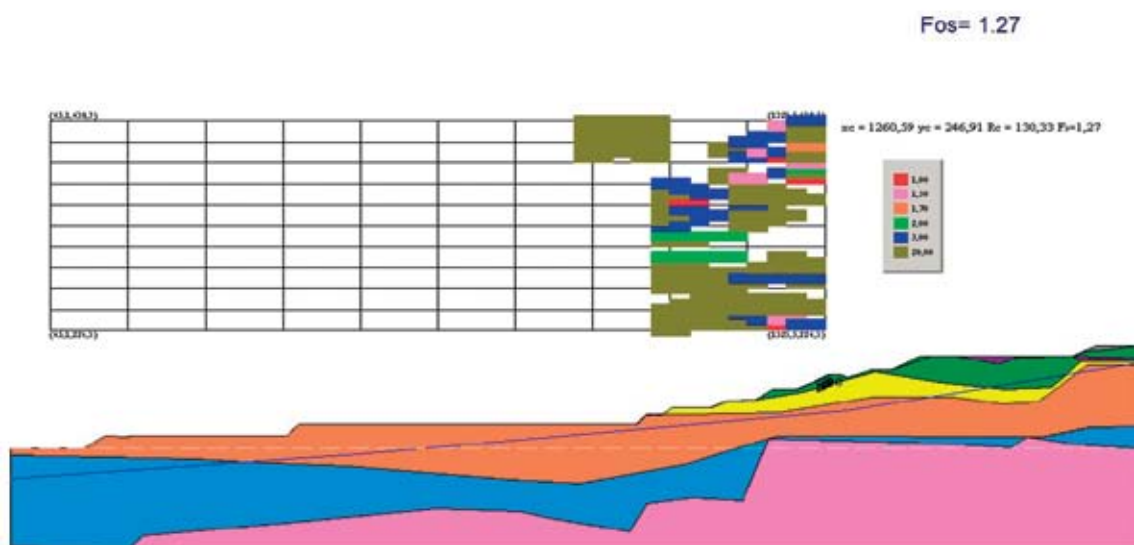


Fig. 23. Analiza stateczności zbocza, 20WE, metoda LEM Janbu, Fos = 1,27

Slope stability analysis, 20WE, LEM Janbu method, Fos = 1.27



Fig. 24. Osuwisko na zboczu zachodnim Pola Belchatów w pobliżu przekroju 18WE

Landslide on the western slope of the Belchatów Field close to cross-section 18WE

MODELOWANIE NUMERYCZNE

Analizy stateczności, ze względu na złożoną strukturę geologiczną, wymagały uogólnienia wprowadzonego modelu zachodniego zbocza odkrywki. W tym celu wydzielono 9 warstw charakteryzujących się zbliżonymi parametrami wytrzymałościowymi. Przy interpretacji wyprowadzonych wartości obliczeniowych wytrzymałości efektywnej wykorzystano zalecane przez Eurokod 7 (PN EN 1997-1:2008, PN-EN 1997-2:2009) na podstawie tzw. doświadczenia porównywalnego. Parametry wytrzymałościowe zastosowane do obliczeń przyjęto z wykonanych badań laboratoryjnych oraz na podstawie skorygowanych wartości z poprzednich badań i modelowania (AKTUALIZACJA ZTE..., 2002; Bednarczyk, 2017). Metoda korekty w odniesieniu do efektywnych parametrów obliczeniowych została oszacowana przy użyciu wcześniejszych ocen i metod (Phoon, Kulhawy, 1999; Hawrysz, 2013). W przypadku skał mezozoicznych parametry określono za pomocą klasyfikacji GSI (Marinos,

Hoek, 2005). Przykładową geometrię wydzielonych warstw przedstawiono na figurze 23. Stateczność zbocza analizowano za pomocą programu Flac 8.0 2D w dwóch przekrojach poprzecznych 18WE i 20WE poprowadzonych w liniach najwyższego spadku (fig. 22–23). Siatka obliczeniowa miała wymiary 1×1 m i obejmowała 50 000 kroków obliczeniowych. Zastosowany model konstytutywny gruntu linear-elastyczny zawierał przybliżoną głębokość występowania zwierciadła wód gruntowych. Wyniki modelowania wskazują na wysokie ryzyko osuwiskowe na zachodnim zboczu. Potwierdzają to obserwacje terenowe i monitoring. Należy dodać, że analizy mają charakter przybliżony, gdyż nie uwzględniają wpływu struktury solnej. Było to spowodowane stosunkowo dużą odległością od wysadu (w skali siatki obliczeniowej dla zbocza) i brakiem reprezentatywnych danych dla wysadu do obliczeń.

Uzyskane w programie Flac współczynniki stateczności były niekorzystne i wahały się od 0,85 w przekroju 18 WE (w pobliżu występującego osuwiska) do 1,14 w przekroju 20 WE. 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 i zastosowaną siatką obliczeniową. Analizy stateczności zbocza zachodniego wykonano także metodami równowagi granicznej LEM metodą Bishopa i Janbu (fig. 24). Wyniki wszystkich wykonanych analiz przedstawiono w tabeli 2.

Otrzymane wyniki analiz programem Flac za pomocą metody SSR wskazują na niski stopień stateczności badanego zbocza, co potwierdzają wyniki monitoringu, pomiary i obserwacje terenowe. Metody LEM przy tych samych parametrach wytrzymałościowych wskazują na zdecydowanie wyższe wartości współczynników stateczności $Fos = 1,34–1,46$ dla przekroju 18WE i $1,16–1,27$ dla 20WE. Wyższe wartości Fos w metodzie LEM związane są z prawdopodobieństwem osuwiska całego zbocza wzdłuż kołowej powierzchni poślizgu podczas gdy metoda SSR dokładnie lokalizuje miejsce osuwiska w profilu zbocza lepiej odzwierciedlając warunki rzeczywiste co potwierdziły wyniki monitoringu i obserwacje terenowe.

Tabela 2

Wyniki analiz stateczności zbocza zachodniego Pola Belchatów
Results of slope stability analysis at the western slope of the Belchatów Field

Metoda Method	Fos przekrój 20WE Fos 20WE cross-section	Uwagi Remarks	Fos przekrój 18WE Fos 18WE cross-section	Uwagi Remarks
SSR Flac	0,83	przemieszczenia w środkowej części zbocza	1,14	przemieszczenia w środkowej i górnej części zbocza
LEM Bishop	1,34	całe zbocze	1,16	małe przemieszczenia w środkowej części zbocza
LEM Janbu	1,46	całe zbocze	1,27	małe przemieszczenia w środkowej części zbocza

WNIOSKI

W artykule przedstawiono największe osuwiska w polskich kopalniach odkrywkowych węgla brunatnego wraz z metodami ich badań i przeciwdziałania. Przykłady te pokazują skalę zagrożeń osuwiskowych i straty, jakie mogą one powodować, w niektórych przypadkach całkowicie zagrażając prowadzeniu eksploatacji i składowaniu nadkładu. Prawdopodobnymi przyczynami osuwisk zwałowisk było ich formowanie bez skutecznego odwadniania warstw podłoża i składowanie gruntów zwałowych na niewłaściwie przygotowanym podłożu. Inne czynniki aktywujące przemieszczenia związane były z niskimi parametrami wytrzymałościowymi nadkładu ilastego transportowanego za pomocą przenośników taśmowych, brak mieszania gruntów o niekorzystnych parametrach wytrzymałościowych z piaskami. Ważna była również duża wysokość robocza i nachylenie skarp zwałowych, budowanych nadsiębiernie. W odkrywkach do powstania osuwisk przyczyniało się zazwyczaj wiele czynników związanych z geologią złoża, jego lokalizacją, geometrią skarp, powierzchniami strukturalnymi, występowaniem gruntów ilastych o niekorzystnych parametrach geologiczno-inżynierskich ale także z czynniki zewnętrznymi, których właściwa interpretacja ma zasadniczą rolę w eliminacji tego typu zdarzeń w przyszłości. Mogą w tym pomóc odpowiednio dobrane metody obserwacji zachodzących zjawisk oraz umiejętnie dobrane sposoby ograniczania ryzyka. Standardowe i zdalne systemy monitoringu, analiza potencjalnych zagrożeń wraz z analizą numeryczną i jak najbardziej ekonomicznym ale jednocześnie bezpiecznym formowaniem skarp odkrywek i zwałowisk mogą wydatnie obniżyć skalę zagrożeń. Ma to szczególne znaczenie przy skali obserwowanych osuwisk i wielkości strat jakie mogą one powodować także dla obszarów do nich przyległych. W każdym przypadku metody monitoringu i stabilizacji powinny być dostosowane do wielkości przemieszczeń i rodzaju występujących zagrożeń. Przy podejmowaniu eksploatacji w pobliżu takich ważnych stref jak filary ochronne, granice państw, ważne obiekty infrastruktury lub składowaniu dużych mas nadkładu na zewnętrznych i wewnętrznych zwałowiskach należy bardzo dokładnie analizować warunki geologiczno-inżynierskie i geotechniczne. Zalecane jest także konsultowanie projektów ich realizacji w szerokim gronie ekspertów reprezentującym różne ośrodki badawcze i uczelnie. Obiekty takie muszą być także regularnie monitorowane i badane w trakcie ich eksploatacji. Umiejętnie dobrane metody monitoringu mają bardzo duże znaczenie dla podjęcia wczesnego przeciwdziałania i zapewnienia bezpieczeństwa dla infrastruktury górniczej i środowiska. Metody te powinny być zawsze dostosowane do rodzaju i wielkości występujących zagrożeń. Indywidualnie zdefiniowane metody monitoringu muszą obejmować (1) zbocza stałe, wyznaczające granice eksploatacji zaprojektowane do dla uzyskania koncesji, pozostające niezmienione w okresach mierzonych w latach, (2) zbocza czasowe, które tworzone są w procesie wydobywczym, wyznaczające obecną na dany czas granicę wydobywania oraz (3) zbocza na zwałowiskach nadkładu. W celu poprawy niezawodności nadzoru

geotechnicznego, dostosowanego do każdej z konfiguracji zboczy, konieczne są szczegółowe badania geotechniczne zboczy i podłoża gruntowego pod zwałowiska nadkładu i dobór dla każdego typu zboczy i wielkości występujących tam przemieszczeń odpowiednich metod monitoringu. W trakcie eksploatacji złoża metody obserwacyjne (Eurokod 7, PN-EN1297-2 2009) mogą być zastosowane do kontroli wielkości zarejestrowanych przemieszczeń i zmian powierzchni terenu w stosunku do przewidywanych wcześniej na etapie projektowym (Eurokod 7, PN-EN1997-1 2008). Standardowe metody badań takie jak dobrej jakości wiercenia rdzeniowe, w połączeniu z geofizyką, badaniami laboratoryjnymi i modelowaniem numerycznym mogą umożliwić oszacowanie parametrów geotechnicznych możliwie najbardziej zbliżonych do rzeczywistych. Przemieszczenia powierzchniowe na dużych obszarach można identyfikować za pomocą wielu metod geodezyjnych, na przykład skaningu laserowego (naziemnego lub lotniczego) lub interferometrii satelitarnej. Należy jednak mieć świadomość że nie wszystkie metody umożliwiają pomiar takich samych zakresów przemieszczeń. Istnieją różnice pomiędzy monitoringiem przemieszczeń powierzchniowych odpowiednim dla charakterystyki przemieszczeń na dużych obszarach a pomiarami przemieszczeń wgłębnych, które mogą wcześniej i dokładniej wykryć drobne przemieszczenia wgłębne poprzedzające zazwyczaj duże osuwiska w najbardziej zagrożonych rejonach. Należy także zaznaczyć, że nie każdy skaner laserowy będzie odpowiedni do skanowania zbocza z odległości ok. 3 km, co wymagane jest w przypadku KWB Bełchatów. Standardowe urządzenia inklinometryczne do pomiarów przemieszczeń wgłębnych mogą nie zawsze umożliwić pomiary przemieszczeń przy większych ich zakresach. Nowoczesne metody monitoringu, które zostały przetestowane przez autora w ramach projektu UE RFCS Slopes w odkrywce Bełchatów, umożliwiły analizę ich uwarunkowań geologiczno-inżynierskich. Stwierdzone tam przemieszczenia wgłębne na zboczu zachodnim wywołane były oddziaływaniem eksploatacji górniczej oraz prawdopodobnie wpływem naprężeń pochodzących od wysadu solnego. Wyniki monitoringu dostarczyły nowych danych do ostrzegania przed zagrożeniami i analiz ryzyka. Zdalny system monitoringu, który jest pierwszym tego typu w polskiej kopalni odkrywkowej, wykrył przemieszczenia o wielkości 280 mm w ciągu 2,5 roku i towarzyszący temu spadek ciśnienia porowego o 230 kPa. Zbocze to charakteryzowało się niskim współczynnikiem stateczności $Fos = 0,83-1,10$. Dane te zostały zweryfikowane przez wyniki badań laboratoryjnych i modelowania numerycznego oraz uzyskanymi ze skanowań lotniczych LiDAR UAV i naziemnego skaningu laserowego. Analizy stateczności zboczy kopalni odkrywkowych, charakteryzujących się bardzo złożonymi warunkami geologiczno-inżynierskimi, są najczęściej przybliżone i mają ograniczenia wynikające z charakteru struktury geologicznej złoża. Ich monitoring pozwala sprawdzić przewidywaną stateczność zbocza. Nowy system zdalnego monitoringu będzie można wykorzystać do wczesnego ostrzegania o zagrożeniach. W innych rejonach KWB Bełchatów satelitarne skanowanie radarowe w wysokiej rozdzielczości pozwoliły a wydzielenie

18 stref charakteryzujących się zwiększonymi wielkościami przemieszczeń, należy mieć jednak świadomość, że otrzymane dane z monitoringu *in situ* są punktowe a wyniki pozostałych metod monitoringu miały za zadanie jedynie przetestowanie tych metod i wymagają wykonania większej liczby pomiarów w celu ich wzajemnej kalibracji.

Pełna eliminacja zagrożeń osuwiskowych w kopalniach odkrywkowych węgla brunatnego nie jest możliwa. Znajomość procesów, które występowały w przeszłości, ich skali, doświadczenia z zastosowanych wtedy metod badań i sposobów przeciwdziałania, jak na przykład zaprezentowane w pierwszej części artykułu osuwiska w KWB Turów i KWB Bełchatów, a także wyniki najnowszych badań powinny przyczynić się do lepszej identyfikacji ryzyka i wyboru optymalnych metod jego ograniczania. Ogromny postęp technologiczny, który dokonał się w ostatnich latach umożliwia znacznie bardziej wszechstronne poznanie zachodzących procesów i wykrywanie potencjalnych zagrożeń jeszcze przed wystąpieniem znaczących przemieszczeń. Wymaga to jednak przeznaczenia na to odpowiednich środków finansowych oraz dyskusji ekspertów do opracowania metod monitoringu najbardziej ekonomicznych pod względem możliwości szybkiego rozpoznania ryzyka i możliwości zastosowania. W miejscach szczególnie narażonych na osuwiska celowym może być opracowanie indywidualnych metod zdalnego monitoringu i szczegółowych procedur postępowania w razie stwierdzenia zagrożeń. Należy jednak podkreślić, że prognozowanie wystąpienia osuwisk w polskich kopalniach odkrywkowych węgla brunatnego i metod przeciwdziałania jest zazwyczaj bardzo złożone. Powinno ono obejmować wykonanie wielu interdyscyplinarnych badań, w tym indywidualnie dostosowanych metod monitoringu już na etapie wykonywania projektów zagospodarowania złóż. W sytuacjach kryzysowych wnikliwa dyskusja problemów przez co najmniej kilka doświadczonych zespołów badawczych może pozwolić na ograniczenie strat. Ma to tym większe znaczenie, że koszt prac monitoringowych i ekspertyz wydaje się początkowo dość wysoki. Jest on jednak znikomy w stosunku do nakładów, jakie należy przeznaczyć na usuwanie skutków osuwisk, prac ratunkowych i stabilizacyjnych umożliwiających wznowienie eksploatacji, bezpieczne składowanie nadkładu oraz nakładów chroniących środowisko naturalne.

Podziękowania. Autor pragnie wyrazić swoją wdzięczność Funduszowi Węgla i Stali Unii Europejskiej oraz Ministerstwu Nauki i Szkolnictwa Wyższego za finansowanie projektu Slopes RFCR-CT-2015-00001. W projekcie koordynowanym przez centrum geomechaniki Uniwersytetu Nottingham uczestniczyły dwa uniwersytety z Wielkiej Brytanii, cztery instytuty badawcze z Czech, Grecji, Francji i Polski oraz trzy specjalistyczne firmy z Hiszpanii oraz Włoch. Pragnę podziękować uczestnikom konsorcjum: Uniwersytetowi Nottingham (UK), Uniwersytetowi Exeter (UK), firmom Geocontrol (Hiszpania), Subterra (Hiszpania), Instytutowi Górnictwa Odkrywkowego VUHU (Czechy), Instytutowi Certh (Grecja), Instytutowi Ineris (Francja). Podziękowania kieruje też do PGE GIEK SA oddział Bełchatów za współpra-

cę w projekcie oraz umożliwienie realizacji badań i pomoc w ich wykonaniu. Pragnę także szczególnie podziękować Prof. A. Marshallowi kierownikowi Centrum Geomechaniki Uniwersytetu Nottingham za zaproponowanie udziału w projekcie i cenne uwagi w trakcie jego trwania, a partnerom z Anglii (Cambrone School of Mines Uniwersytet Exeter) i Francji (Instytut Ineris) za wykonanie skanowania LIDAR i TLS w Polsce.

LITERATURA

- AKTUALIZACJA ZTE POLA SZCZERCOW WRAZ Z BIZNESPLANEM. WYDOBYCIE MAKSYMALNE, 2002 – Część Ogólna Nr projektu – 1030.1325.002. Wrocław, Poltegor- Projekt.
- BEDNARCZYK Z., 2011 – Pierwszy w Polsce system wczesnego ostrzegania o zagrożeniu osuwiskowym w czasie rzeczywistym na podstawie wybranych lokalizacji w Beskidach. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **445**, 1:1–7.
- BEDNARCZYK Z., 2012 – Metody Badań i Monitoringu Osuwisk. Wydaw. Górnictwo Odkrywkowe, Wrocław.
- BEDNARCZYK Z., 2017 – Slope Stability Analysis for the Design of a New Lignite Open-Pit Mine. *Procedia Engineering*, **191**, 51–58. doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.153.
- BEDNARCZYK Z., 2018a – Identification of flysch landslide triggers using “nearly real-time” monitoring data – An example from the Carpathian Mountains’ Poland. *Engineering Geology*, **244**: 41–56.
- BEDNARCZYK Z., 2018b – Geotechnical Investigations of Mine-Induced Ground Movements in Polish Opencast Mines. *W: IAEG/AEG Annual Meeting Proceedings, San Francisco, California – Volume 3 Mining, Aggregates, Karst, Part I, Mining*, editors Abdul Shakoor and Kerry Cato, Springer International, doi.org/10.1007/978-3-319-93130-2: 3–13.
- BEDNARCZYK Z., JANECKI W., 1995 – Nadzór geotechniczny nad zwałowaniem zewnętrznym KWB Turów. Rozpoznanie geologiczne i geotechniczne rejonu osuwiska na zboczu wschodnim. Przekroje przez teren osuwiska. P.I.W. Geosoft. nr arch. 95/NAD/006, Wrocław.
- BEDNARCZYK J., NOWAK A., 2010 – Strategie i scenariusze perspektywicznego rozwoju produkcji energii elektrycznej z węgla brunatnego w świetle występujących uwarunkowań. *Gór. Geoinż.*, **34**, 4: 67–83.
- BEDNARCZYK Z., SANDVEN R., 2004 – Comparison of CPTU and laboratory tests interpretation for Polish and Norwegian clays. *W: International Site Characterization Conference Isc-2 Porto*, Millpress: 1791–1799.
- BORECKA A., 2007a – Grunt zwałowy – problemy w ocenie parametrów fizykomechanicznych. *Geologos*, **11**: 131–132.
- BORECKA A., 2007b – Właściwości gruntów zwałowych z KWB „Turów” oraz próba ich oceny na podstawie sondowań statycznych. [pr. doktor.]. AGH, Kraków.
- CAŁA M., CZARNECKI L., KOWALSKI M., JAKÓBCZYK J., 2019 – Wielkoskalowe procesy osuwiskowe – studium przypadku. *W: II Ogólnopolska Konferencja Osuwiskowa, O!suwisko II, Szczawnica 14–17 maja 2019, Materiały kongresu (streszczenia)*. Internet: <https://konferencje.pgi.gov.pl/pl/osuwiska-2019-program.html> (dostęp: 16.12.2019).
- CIUK E. PIWOCKI M., 1980 – Geologia trzeciorzędu w rowie Kleszczowa i jego otoczeniu. *W: Przewodnik LII Zjazdu PTG*: 38–56.
- CRUDEN DM, VARNES D., J, 1996 – Landslide types and processes. *W: Landslides, investigation and mitigation*, vol. 3.

- (red. A.K. Turner, G.P. Schuster) Special report 247, Transportation Research Board, Nat. Research Council, National Acad. Press, Washington: 36–75.
- CZARNECKI L., ORGANIŚCIAK B., KRYWULT L., CHROSTA., 2010 – Stateczność zachodniego zbocza stałego wyrobiska Kopalni Bełchatów w świetle obserwacji geologicznych i pomiarów specjalistycznych z uwzględnieniem rejonu wysadu solnego. *Gór. Geoinż.*, **34**, 2: 173–182.
- CZARNECKI L., ORGANIŚCIAK B., 2015 – Zagrożenie stateczności zbocza stałego południowego wyprofilowanego w skałach podłoża mezozoicznego, w rejonie prowadzenia eksploatacji w rowie II-rzędu, w zakładzie górniczym KWB Bełchatów. *W: Materiały Kongresu Górniczego- CD, sesja C–5*.
- DMITRUK S., 1984 – Problemy modelowania geotechnicznego w górnictwie odkrywkowym. Wydaw. Geologiczne, Warszawa.
- DMITRUK S., 1995 – Analiza warunków geotechnicznych osuwiska w południowo-wschodniej części zwałowiska zewnętrznego KWB Turów. Prace własne Instytutu Hydrotechniki i Geotechniki Politechniki Wrocławskiej [niepubl.].
- DMITRUK S., SUCHNICKA H., 1976 – Geotechniczne zabezpieczenie wydobywania w górnictwie odkrywkowym i na powierzchni. Oficyna Wydawnicza PWr, Wrocław.
- FLISIAK J., RYBICKI S., TYLIKOWSKI M., 2014 – Ocena zagrożenia osuwiskowego w kopalniach odkrywkowych na przykładzie KWB Bełchatów i KWB Turów. *Prz. Geol.*, **10**, 2: 563–572.
- HAWRYSZ M., 2013 – Metody oceny efektywnych parametrów wytrzymałości gruntów. *GDMT, geoinżynieria drogi mosty tunele*, **3**: 34–44.
- JANECKI W., BEDNARCZYK Z. 1998 – Sprawozdanie z sondowania CPT i CPTU oraz poboru prób gruntu NNS przeprowadzonych na przedpolu zwałowania Z-44 i w rejonie przenośnika Z-4.8 zwałowiska zewnętrznego KWB Turów P.I.W. Geosoft [nr arch. 98/SPR/004].
- JANECKI W., BEDNARCZYK Z., KOCHAŃSKI T., 1995 – Założenia techniczno-ekonomiczne zwałowania zewnętrznego w KWB Turów na lata 1995–2000, część geotechniczna. P.I.W. Geosoft [nr arch. 95/PR/GT/94/10].
- JANECKI W., BEDNARCZYK Z., KOCHAŃSKI T., 1996a – Nadzór geotechniczny nad zwałowaniem zewnętrznym KWB Turów. Rozpoznanie geologiczne i geotechniczne rejonu osuwiska na zboczu wschodnim. Przekroje przez teren osuwiska”. P.I.W. Geosoft [nr arch. 95/NAD/006].
- JANECKI W., BEDNARCZYK Z., ZEMBRONSKI J., 1996b – Sprawozdanie z sondowań CPTU wykonanych w korpusie zwałowisk zewnętrznego i wewnętrznego KWB Turów”. P.I.W. Geosoft [nr arch. 96/SPR/010].
- JANECKI W., BEDNARCZYK Z., ZEMBRONSKI J., 1998 – Wstępne rozpoznanie geotechniczne w rejonie osuwiska 20S w KWB Bełchatów P.I.W. Geosoft [nr arch. EKS/03].
- JANECKI W., BEDNARCZYK Z., ZEMBRONSKI J., 1999 – Rozpoznanie warunków geotechnicznych części zbocza południowego KWB Bełchatów w rejonie zejścia do rowu II rzędu i północnego na wysokości +124/+94 w IV piętrze górniczym, pomiędzy liniami 60 i 61 SN.
- JOŃCZYK W., ORGANIŚCIAK B., 2010 – Zagrożenia naturalne w KWB Bełchatów identyfikacja i przeciwdziałanie. *Gór. Geoinż.*, **34**, 4: 249–257.
- JOŃCZYK W., ORGANIŚCIAK B., SEDOR A., 2013 – Ograniczanie zagrożeń osuwiskowych dla poprawy bezpieczeństwa robót górniczych na przykładzie Kopalni Bełchatów. *W: Mat. Konf. Szkoła Górnictwa Odkrywkowego. AGH Kraków*.
- KACZMARCZYK R., 2003 – Geotechniczne właściwości stref kontaktów ilasto-węglowych w górotworze niektórych kopalni węgla brunatnego. *Pr. Nauk. Inst. Gór. PWr*, **103**, 36: 65–72.
- KASZTELEWICZ Z., 2012 – Węgiel brunatny na świecie i w Polsce. *Węgiel Brunatny*, **78**, 1: 7–13.
- KURPIEWSKA I., WCISŁO A., CZARNECKI L., JURCZYK M., 2013 – Kategoryzacja rejonów zagrożeń geologiczno-inżynierskich Wydzielanych w kopalniach odkrywkowych jako narzędzie podnoszące bezpieczeństwo eksploatacji na przykładzie wyrobiska pola Szczerców. *Gór. Odkryw.*, **1**: 5–12.
- MARINOS V.P., HOEK E., 2005 – The Geological Strength Index: applications and limitations. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, **64**: 55–65.
- MARSHALL A. I IN., 2019 – Final Slopes Project Report Deliverable 4.3.1. European Commission Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel, Technical Group: TGC1, Grant Agreement number RFCR-CT-2015-00001 Project Slopes – Smarter Lignite Open Pit Engineering Solutions: 1–120.
- MILKOWSKI D., KACZEREWski T., 2009 – Rutschungsgefahr am Neißepfeiler und Erdrutsch „Swiniec” auf der Außenkippe des Tagebaues Turów. 7 Tagung für Ingenieurgeologie. Hochschule Zittau/Gorlitz Publication, FDGG Fachsection Ingenieurgeologie: 114–120.
- PATRZYK J., 1996 – Zagrożenie osuwiskowe w KWB Bełchatów. *Mies. WUG*, **2**: 13–16.
- PHOON K., KULHAWY F.H., 1999 – Characterization of geotechnical variability. *Canadian. Geotechnical J.*, **36**: 612–624.
- PN EN 1997-1:2008 – Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.
- PN-EN 1997-2:2009 – Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne. Część 2 :Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.
- RYBICKI S., 1996 – Zjawiska osuwiskowe w krajowych kopalniach węgla brunatnego. *W: Problemy Geotechniczne w Praktyce Inżynierskiej*: 157–164. Wydaw. Polit. Krakowskiej, Kraków.

SUMMARY

The paper presents the largest landslides in Polish lignite opencast mines together with implemented investigation and counteraction methods. These examples show the scale of landslide hazard in lignite opencast mines and present losses that in some cases can completely threaten the exploitation and storage of overburden. The most probable causes of landslides in spoil dumps were the lack of effective drainage of bedrock layers and the development of dumping grounds on improperly prepared soils. Other triggers of displacement

were related to low strength parameters of clayey overburden transported by the conveyor belt transportation system, and the lack of mixing of soils of unfavorable strength parameters with sands. The slope height and the gradient of embankments were also important. In open pits, triggers were connected with a number of factors, such as the geology of the deposit, its location, the geometry of slopes, occurrence of structural surfaces, and low strength clayey soils, and external factors, whose proper interpretation is essential for

the elimination of factors that contributed to the formation of landslides. This can be helped by appropriately selected methods of observation of phenomena and skillfully selected ways of risk mitigation. Standard and remote monitoring systems, analysis of potential threats supported by numerical analysis, and the most economical and safe design of open-cast and dump slopes may significantly reduce the scale of threats. This is particularly important in view of the scale of the observed landslides and the amount of losses they may cause also in adjacent areas. In any case, the methods of monitoring and stabilization should be adapted to the size of the displacements and the type of threats. When undertaking exploitation in the vicinity of important zones, such as protection pillars, national borders, important infrastructure, or storage of large overburden masses on external and internal dumping grounds, the geological-engineering and geotechnical conditions should be analyzed very carefully. It is also recommended to consult projects of their implementation with a wide range of experts representing research centres and universities. Mines and spoil dumps must be regularly monitored and inspected during their operation. Skillfully selected monitoring methods are very important for early prevention and ensuring safety of mining infrastructure and the environment. These methods should always be adapted to the type and magnitude of the risks involved. Individually defined monitoring methods must include (1) fixed slopes, setting the boundaries of exploitation designed for obtaining a license, remaining unchanged in the periods measured in years, (2) time slopes, which are formed in the mining process, setting the current extraction limit for a given time, and (3) slopes in overburden dump sites. In order to improve the reliability of geotechnical supervision, adapted to each configuration of slopes, it is necessary to conduct detailed geotechnical investigations of slopes and spoil dumps to select appropriate monitoring methods for each type of slopes and the size of possible displacements. During the exploitation, observation methods (Eurocode 7, PN-EN1297-2 2009) may be used to control the amount of recorded surface and ground displacements in relation to those predicted earlier at the design stage (Eurocode 7, PN-EN1997-1 2008). Standard methods, such as good quality core drilling, combined with geophysics, laboratory tests, and numerical modelling, can make it possible to estimate geotechnical parameters as close to real in the field. Surface movements over large areas can be identified by many geodetic methods, such as laser scanning (terrestrial or aerial) or satellite interferometry. However, it is important to be aware that not all methods can measure the same range of displacements. There are differences between surface displacements that are good for large areas and ground displacement that can detect small ground movements earlier and more accurately, preceding usually large movements. It also should be noted that not every laser scanner will be suitable for scanning from a distance of approximately 3 km, which is required in the case of the Bełchatów Mine. Standard inclinometer devices for measuring

of ground displacement may not allow for measurements at larger ranges. Modern monitoring methods tested by the author within the framework of the EU RFCS Slopes project in the Bełchatów Mine made possible to analyze geological engineering conditions. The displacements on the western slope were caused by the impact of mining exploitation and probably also by changes of stresses in the salt diapir. The monitoring results provided new data for warning and risk analysis. The on-line monitoring system, which is the first of its kind in a Polish open-pit mine, detected displacements of 280 millimetres during 2.5 years and the accompanying drop in pore pressure by 230 kPa. This slope was characterized by a low stability factor $Fos = 0.83-1.10$. The data were verified by the results of laboratory tests and numerical modelling, and by the monitoring results obtained from LiDAR UAV scans and TLS. The results of numerical modelling checked the stability of the slope. However, the results are approximate due to the limitations resulting from the geological structure of the slope. The new on-line system could be used for early warning. In other regions of the Bełchatów Mine, satellite radar scanning in high resolution allowed for the separation of 18 zones characterized by increased displacement, but one should be aware that the data obtained from the in-situ monitoring are point-based. The results of other monitoring methods were intended only to test these methods and require more measurements in order to calibrate them. Full elimination of landslide hazards in open-cast lignite mines is not possible. Knowledge of these processes that existed in the past, their scale, experience from the applied research and counteraction methods, as presented in the first part of the article on landslides in the Turów and Bełchatów mines, as well as the results of the latest research should contribute to a better identification of risk and selection of optimal methods of its reduction. The enormous technological progress that has been made in recent years enables a much more comprehensive understanding of the undergoing processes and the detection of potential hazards even before significant displacements will occur. However, this requires adequate resources and expert discussion to design the most cost-effective and accurate monitoring methods. In places particularly exposed to landslides, it may be advisable to develop individual methods of remote monitoring and detailed procedures for threats reduction. It should be stressed, however, that forecasting of landslide occurrence in Polish open-cast lignite mines and counteracting them is usually very complex. It should include the execution of many interdisciplinary studies, including individually dedicated monitoring methods already at the mine design stage. In crisis situations, a discussion of the problems by at least a few experienced research teams may allow limiting the losses. This is all the more important because the initial cost of monitoring and expert opinions seems to be quite high; however, it is very low in relation to the cost of landslide remediation enabling safe exploitation, storage of the overburden, and protection of the environment.