

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences (2018), 27 (2), 152–166
Sci. Rev. Eng. Env. Sci. (2018), 27 (2)
Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (2018), 27 (2), 152–166
Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. (2018), 27 (2)
<http://iks.pn.sggw.pl>
DOI 10.22630/PNIKS.2018.27.2.15

Zbigniew BEDNARCZYK

Instytut Górnictwa Odkrywkowego „Poltegor-Instytut” we Wrocławiu

Nowoczesne metody monitoringu geotechnicznego w polskich odkrywkowych kopalniach węgla brunatnego

Advanced geotechnical engineering monitoring methods in Polish opencast lignite mines

Słowa kluczowe: monitoring geotechniczny, osuwiska, stateczność zboczy w górnictwie odkrywkowym

Key words: geotechnical monitoring, landslides, slope stability in opencast mining

Wprowadzenie

Wydobycie węgla brunatnego, jednego z najtańszych źródeł energii ma wciąż znaczący udział w produkcji energii elektrycznej w wielu krajach europejskich. W Polsce jest to prawie 30%. Niemcy, Grecja, Polska, Czechy, Bułgaria, Rumunia i Niemcy produkują około 96% węgla brunatnego Unii Europejskiej, co daje łącznie 433,8 mln t rocznie (Bednarczyk i Nowak, 2010; Kasztelewicz, 2012). Często wiąże się to z zagrożeniami geotechnicznymi spowodowanymi głębokością odkrywek, budową geologiczną, opadami atmosferycznymi, zmianami poziomu wód gruntowych, wysycha-

niem, słabymi parametrami wytrzymałościowymi gruntów ilastych, odprężeniem górotworu, procesami krasowymi i zjawiskami sejsmicznymi. Przemieszczenia wgłębne występujące na zboczach polskich odkrywek węgla brunatnego i towarzyszących im zwałowisk nadkładu można zdefiniować jako osuwiska gruntowe wywołane przez działalność górnictw (Cruden i Varnes, 1996). Zapobieganie tym zjawiskom jest zazwyczaj trudne. Duża skala potencjalnych zagrożeń może powodować poważne straty ekonomiczne i negatywnie wpływać na środowisko naturalne (Bednarczyk, 2017a). Interpretacja reprezentatywnych parametrów wytrzymałościowych jest zazwyczaj utrudniona np. ze względu na wysoki stopień przekonsolidowania i częściową saturację gruntów ilastych w odkrywkach i parametry gruntów antropogenicznych na zwałowiskach nadkładu (Bednarczyk, 2017b). Zagrożenia geotechniczne występują często także

w polskich kopalniach węgla brunatnego, np. na południowym zboczu odkrywki KWB Bełchatów, powyżej tzw. rowu drugiego rzędu charakteryzującego się największą miąższością węgla. Stwierdzono je także na zachodnim zboczu w pobliżu wysadu solnego. Artykuł prezentuje ogólną charakterystykę tych zagrożeń wraz ze wstępnymi wynikami uzyskanymi w ramach projektu UE Euracoal SLOPES.

Główne zadanie projektu Slopes

Projekt Euracoal SLOPES „Smarter Lignite Open Pit Engineering Solutions” RFCS-CT-2015-00001 jest wykonywany przez międzynarodowe konsorcjum sześciu krajów europejskich. Podstawowym jego zadaniem jest odpowiedź na problemy geotechniczne w górnictwie odkrywkowym węgla brunatnego. Projekt ma na celu praktyczne zastosowanie nowych metod monitoringu i analizy danych. Jest realizowany w wybranych odkrywkach węgla brunatnego w Polsce, Czechach, Hiszpanii i Grecji. Członkowie konsorcjum to: Uniwersytet Nottingham (UK), Uniwersytet Exeter (UK), Geocontrol (Hiszpania), Subterra (Hiszpania), Instytut VUHU (Czechy), Instytut Certh (Grecja), Instytut INERIS (Francja) oraz Poltegor-Instytut (Polska). W ramach projektu realizowane są cztery zadania badawcze. Obejmują one praktyczne zastosowanie i analizę różnorodnych metod monitoringu przemieszczeń wglębnych i powierzchniowych w wybranych odkrywkach (WP-1). Uzyskane wyniki mają przyczynić się do lepszego zrozumienia i ograniczenia skutków niekorzystnych zjawisk naturalnych oraz

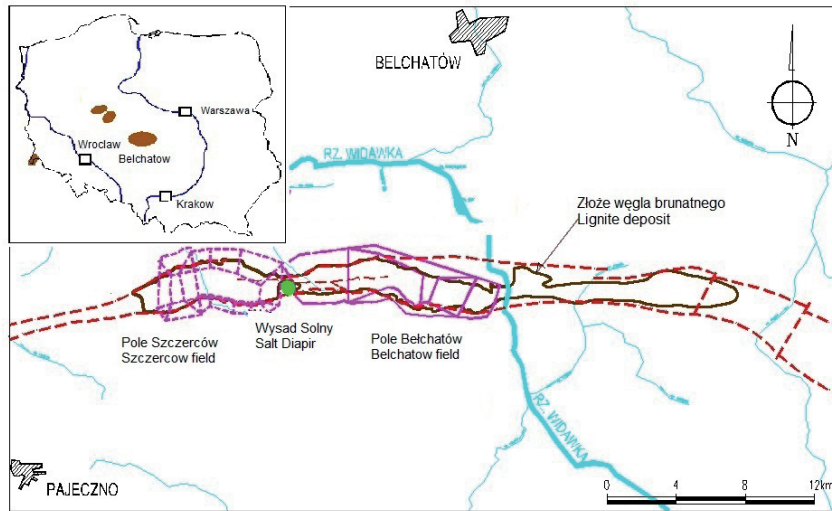
opracowania metod przeciwdziałania opartych na ocenie ryzyka (WP-2). Celem tych badań jest dostarczenie nowych informacji dla bardziej bezpiecznego projektowania zboczy kopalni odkrywkowych, tras transportowych i zwałowisk nadkładu (WP-3). Koordynacją projektu zajmuje się Centrum Geomechaniki Uniwersytetu Nottingham (WP-4). Chcąc wiarygodnie określić rodzaje możliwych zagrożeń, należy mieć szczegółową wiedzę dotyczącą budowy geologicznej. Dane te muszą być scharakteryzowane ilościowo i jakościowo. Zbieranie danych geologicznych, takich jak: rodzaj występujących gruntów i skał, wytrzymałość na ścinanie, kierunek układu warstw, występowanie uskoków i fałdów, określenie głębokości wód gruntowych, obciążeń statycznych i dynamicznych oraz zjawisk sejsmicznych, jest ważnym kluczem do wyboru instrumentów pomiarowych i definicji parametrów, które powinny być objęte monitoringiem. Celem stosowania tych technologii jest uzyskanie reprezentatywnych wyników, które mogą być wykorzystane do ocen ryzyka, ich walidacji i symulacji numerycznych indywidualnie dedykowanych strategii przeciwdziałania. W każdej kopalni odkrywkowej istnieją trzy rodzaje zboczy: zbocza stałe, wyznaczające granice eksploatacji zaprojektowane w celu uzyskania koncesji, pozostające niezmiennie w okresach mierzonych w latach; zbocza czasowe, które są tworzone w procesie wydobywczym, wyznaczające obecną na dany czas granicę wydobycia; zbocza na niezbędnych zwałowiskach nadkładu. Zbocza te mogą stwarzać liczne zagrożenia stateczności także dla obszarów do nich przyległych.

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 odpowiednich metod monitoringu. W trakcie eksploatacji metody obserwacyjne (PN-EN 1997-2:2009, Eurokod 7) mogą być zastosowane do kontroli wielkości zarejestrowanych przemieszczeń i zmian powierzchni terenu w stosunku do przewidywanych wcześniej na etapie projektowym (Eurokod 7, PN-EN 1997-1:2008). 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, np. skaningu laserowego (naziemnego lub lotniczego) lub interferometrii satelitarnej. W ramach projektu Euracoal SLOPES wykorzystuje się bezzałogowe drony w celu pozyskania danych techniką LiDAR. Jest to nowe zastosowanie tej technologii w sektorze górnictwa odkrywkowego i projektów RFCS. Zastosowanie nowoczesnych metod monitoringu on-line, zarządzania danymi i innych zaawansowanych metod monitoringu jest obecnie testowane w KWB Bełchatów. Zainstalowano tam monitoring inklinometryczny i ciśnienia porowego on-line (Poltegor-Institut, Polska), wykonuje się satelitarne radarowe pomiary interferometryczne PSI (Politechnika Bari – GAP, Włochy), naziemne skanowanie laserowe (Uniwersytet Exeter, UK), ska-

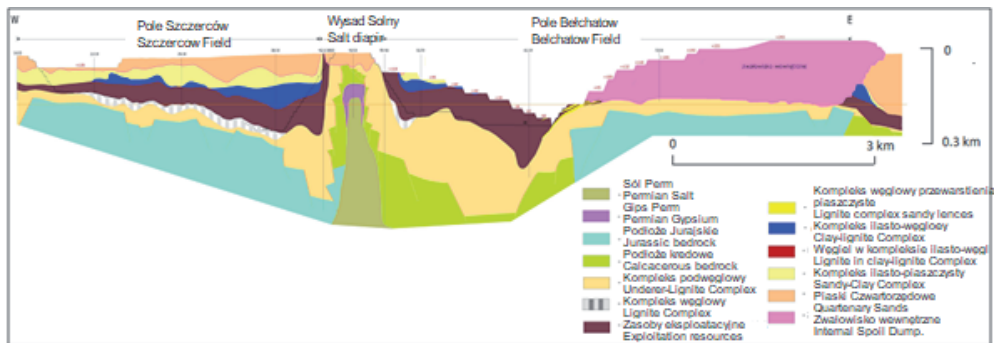
nowanie LiDAR-UAV (Intris, Francja), badania parametrów wytrzymałościowych gruntów zwałowych w aparacie trójosiowym i aparacie typu centrifuge (Centrum Geomechaniki Uniwersytetu Nottingham, UK) oraz modelowanie numeryczne (Poltegor-Institut, Polska). Uczestnicy projektu mogli praktycznie zapoznać się z zagrożeniami występującymi w odkrywce KWB Bełchatów. Uniwersytet Exeter Camborne School of Mines (UK) wykonał pomiary zachodniego zbocza odkrywki KWB Bełchatów metodą skaningu laserowego, a Instytut Indris (Francja) skanowanie tego rejonu metodą LiDAR-UAV. Pomiary monitoringowe wykonywane przez Poltegor-Institut na zachodnim zboczu odkrywki KWB Bełchatów zawierały system monitoringu przemieszczeń i ciśnienia porowego on-line do głębokości 100 m oraz interferometrię satelitarną PSI. Badany rejon na poziomie od poniżej +42 m n.p.m. do –58 m n.p.m. nie był dotychczas objęty monitoringiem inklinometrycznym. Wyniki monitoringu i badania trójosiowe, które są obecnie w toku, oraz modelowanie numeryczne powinny pozwolić na lepsze wykorzystanie uzyskanych danych w celu przeciwdziałania zagrożeniom.

Lokalizacja i budowa geologiczna terenu badań w Polsce

Odkrywka KWB Bełchatów znajduje się w głębokim rowie tektonicznym, utworzonym w skałach mezozoicznych (głównie wapieniach i marglach), wypełnionym neogeńskimi gruntami ilasto-piaszczystymi z węglem brunatnym (rys. 1 i 2). Struktura wewnętrzna rowu



RYSUNEK 1. Lokalizacja odkrywki węgla brunatnego Belchatów
 FIGURE 1. Localization of the Belchatów Lignite Opencast Mine



RYSUNEK 2. Kopalnia Węgla Brunatnego Belchatów, przekrój geologiczny W-E
 FIGURE 2. Belchatów Lignite Opencast Mine, W-E geological cross-section

Kleszczowa składa się głównie z bloków mezozoicznych rozdzielonych wzdłuż powierzchni uskoków i fałdów. Grubość osadów neogenu w obrębie rowu wynosząca około 150–310 m jest około 5–15 razy większa niż na zewnątrz (Ciuk i Piwocki, 1980). Grubość głównego pokładu węgla brunatnego waha się w granicach 20–60 m. Kopalnia prowadzi eksploatację węgla w dwóch lokalizacjach na tzw. Polu Belchatów i Polu Szczerców.

Oddzielone są one wysadem solnym Dębiny (rys. 2). Największa objętość węgla znajduje się w tzw. rowie drugiego rzędu, w pobliżu południowego zbocza. Eksploatacja Pola Belchatów zakończy się prawdopodobnie w 2018 roku, a Pola Szczerców w 2038 roku. Niekorzystne parametry wytrzymałościowe gruntów ilastych znajdujących się w nadkładzie oraz ponad 300-metrowa złożona struktura tektoniczna powodują poważne

zagrożenie geotechniczne, które mogą występować także po zakończeniu eksploatacji i w trakcie rekultywacji.

Co roku w obu lokalizacjach rejestrowano setki małych i dużych osuwisk o objętości wynoszącej nawet kilka milionów metrów sześciennych (Patrzyk, 1996; Rybicki, 1996; Jonczyk, Organiściak i Sedor, 2013). Pojedyncze osuwisko miało najczęściej objętość od kilku tysięcy do 3,5 mln m³ i przemieszczenia od 2 mm do nawet 2 m dziennie. Niekorzystne warunki geotechniczne stwierdzono też na północnym zboczu kopalni, gdzie osuwiska w czwartorzędowych gruntach zastoiskowych i ilach warwowych stwarzały zagrożenie dla zlokalizowanych tam ciągów transportowych przenośników taśmowych i linii zasilania. Głównymi powierzchniami strukturalnymi podatnymi na procesy osuwiskowe są kontakty litologiczne osadów czwartorzędowych i neogenu oraz granica ilów neogenu i głównego pokładu węgla. Inne strefy predystynujące wymienione procesy to: uskoki, powierzchnie tektoniczne i glacitektoniczne oraz grunty zastoiskowe i ily warwowe charakteryzujące się niekorzystnymi parametrami geotechnicznymi.

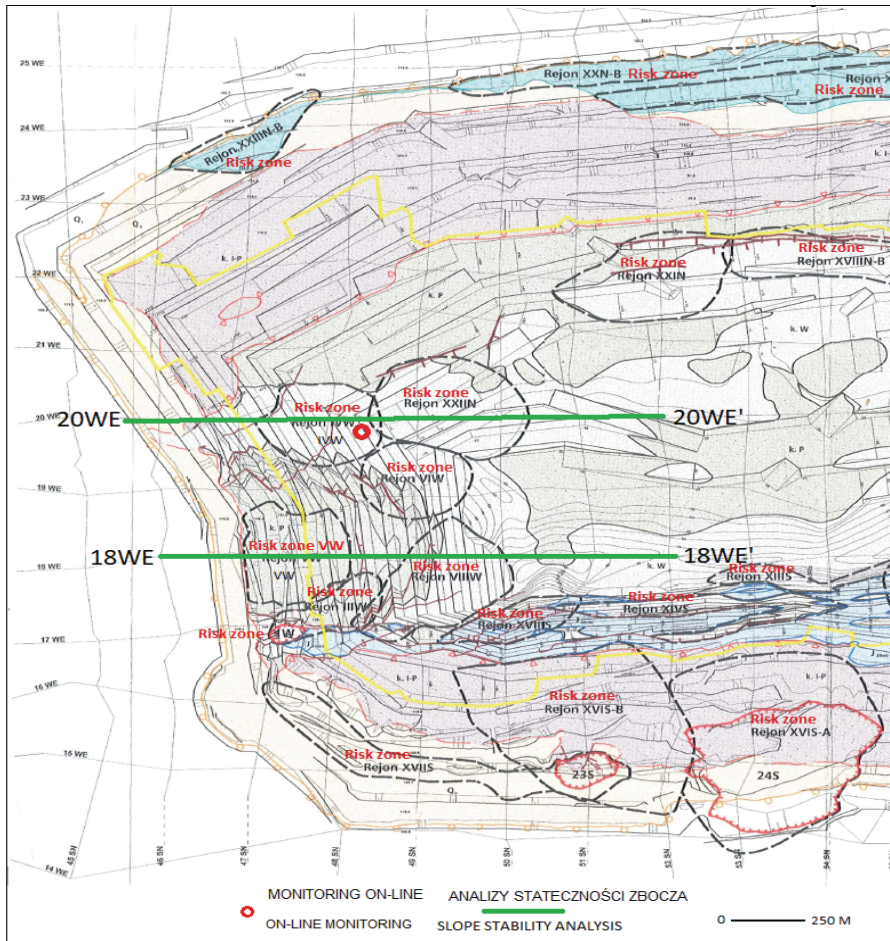
Warunki geotechniczne terenu badań

Warunki geotechniczne zachodniego zbocza są ukształtowane przez złożoną budowę geologiczną, głębokość wyrobiska oraz wpływ wysadu solnego (rys. 2). Kontur wysadu o wielkości około 200 × 500 m, jest nieregularny, podobny do owalnego, lekko wydłużony w kierunku południowo-wschodnim. Ma on pra-

wie pionowe ściany o nachyleniu 2–3° i miąższości około 3000 m (Ciuk i Piwoczek, 1980). Jego młodsza górna część jest zdominowana przez sole z anhydrytem środkowego cechsztynu. Strop występuje na głębokości 160–220 m. Węgiel brunatny został wypiętrzony i występuje płytko w postaci antykliny. Zachodnie zbocze jest poddawane bardzo złożonym naprężeniom w górotworze. Spowodowane jest to oddziaływaniem wyrobiska górniczego i wysadu solnego (Czarnecki, Organiściak, Krywult i Chrost, 2010). Występują tam liczne problemy związane z brakiem stateczności (rys. 3). Zmiany stanu naprężeń, spękania, otwieranie naturalnych szczelin w górotworze sprzyjają procesom infiltracji wód opadowych i zmianom saturacji gruntów, co bezpośrednio aktywuje przemieszczenia. Na podstawie wcześniejszych obserwacji terenowych i monitoringowych stwierdzono, że przemieszczenia w kierunku wyrobiska występowały na stropie kompleksu węglowego. Zaobserwowano także przemieszczenia wypiętrzające pokład węgla brunatnego w kierunku wyrobiska. W ramach unijnego projektu Euracoal SLOPES na poziomie +42 m n.p.m. zainstalowano system on-line rejestrujący przemieszczenia do poziomu –58 m n.p.m., który nie był wcześniej objęty monitoringiem inklinometrycznym (rys. 3).

Badania terenowe i laboratoryjne gruntów w KWB Belchatów

Wykonane przez Poltegor-Institut badania obejmowały opis otworu rdzeniowego 132 mm (rys. 4), pobranie 31 próbek gruntów oraz instalację syste-

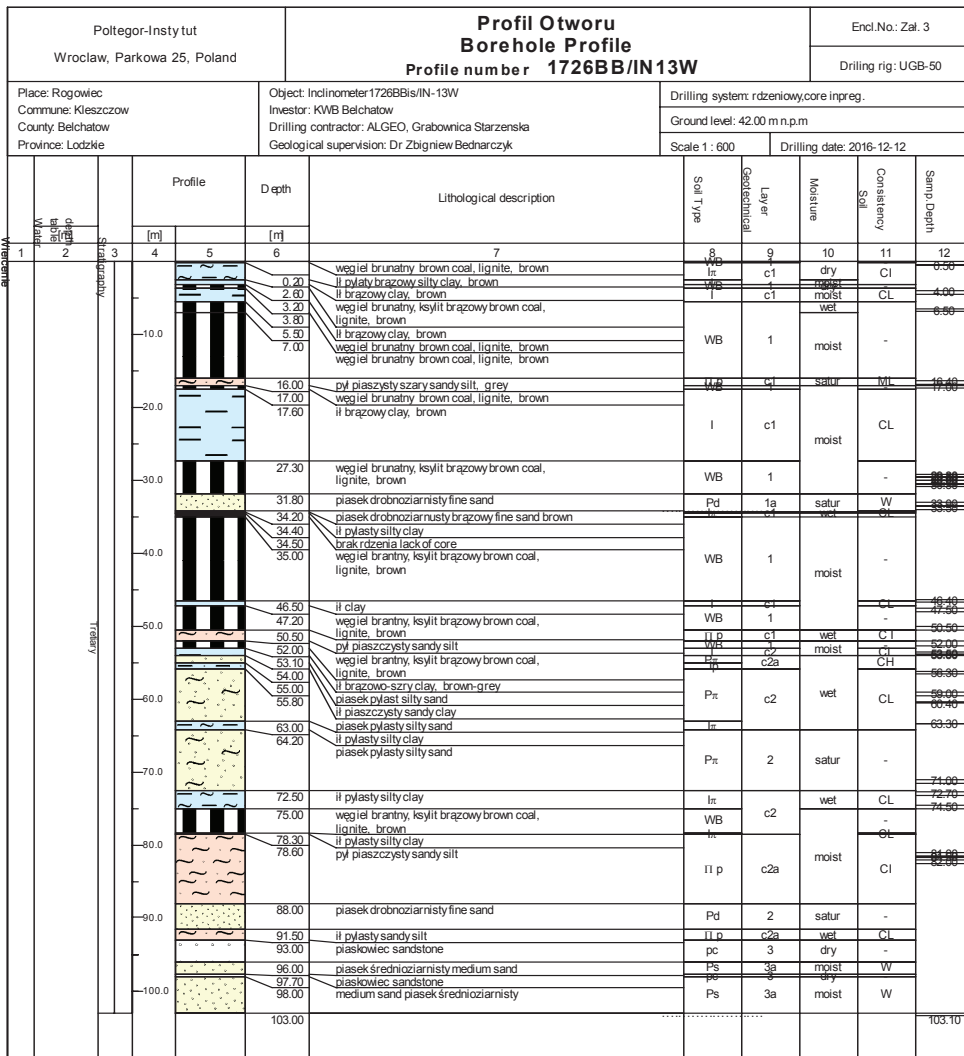


RYSUNEK 3. Usytuowanie badanego obszaru na zachodnim zboczu w obrębie Pola Belchatów
 FIGURE 3. Localization of investigated area on western slope of Belchatów Field

mu monitoringu on-line (rys. 5). Otwór wiertniczy zlokalizowano w strefie zagrożenia IV W przyległej do strony północno-wschodniej wysadu solnego. Analiza uziarnienia wykazała, że badane grunty reprezentują gliny piaszczyste, ły i piaski gliniaste, z największą wilgotnością naturalną w piaskach gliniastych – 32,8%, a najmniejszą w piaskach 13,6–16,3%. Zawartość części organicznych była bardzo duża i wynosiła 3–19,3%. Gęstość objętościowa waha-

ła się od 1,64 g·cm⁻³ w glinach piaszczystych do 2,29 g·cm⁻³ w piasku gliniastym.

Najniższy stopień plastyczności (I_L) zarejestrowano w glinie piaszczystej (0,17), a najwyższy w ile piaszczystym (0,41). Badania w aparacie bezpośredniego ścinania wykonywane z prędkością 0,01mm·min⁻¹ przy naprężeniach 0; 12,5; 25; 50 i 100 kPa i z użyciem drenazu (płytką perforowaną w podstawie aparatu skrzynkowego 6 × 6 cm)



RYSUNEK 4. Profil otworu do instalacji systemu monitoringu
FIGURE 4. Borehole profile for in situ instrumentation

System monitoringu on-line w KWB Belchatów

wykazały wartość spójności w glinach piaszczystych wynoszącą 19,5 kPa i kąt tarcia 22,8°. Badania ściśliwości wykazały moduły edometryczne ściśliwości pierwotnej (M_0) i wtórnej (M) wynoszące odpowiednio: 1,74 i MPa 8,4 MPa.

System inklinometryczny o głębokości 100 m składa się z 200 czujników przemieszczeń, 3 magnetometrów oraz czujnika ciśnienia porowego w grun-

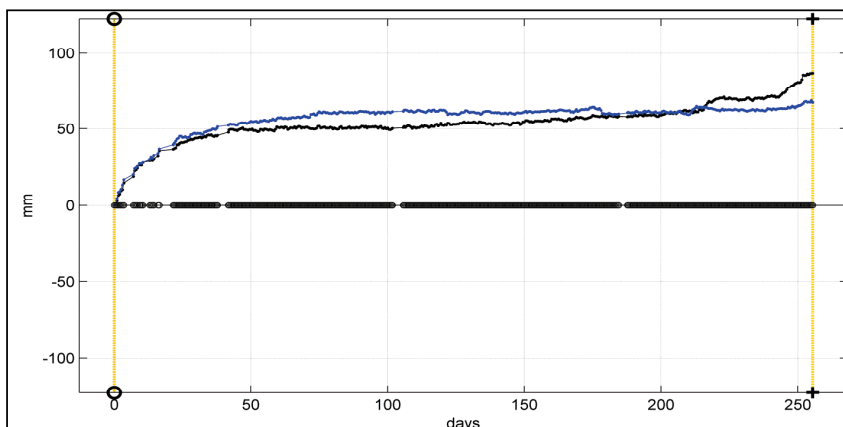


RYSUNEK 5. Stacja monitoringu on-line na poziomie +42 m n.p.m., w KWB Bełchatów
 FIGURE 5. On-line monitoring station at level +42 m a.s.l. in Bełchatów Lignite Opencast Mine

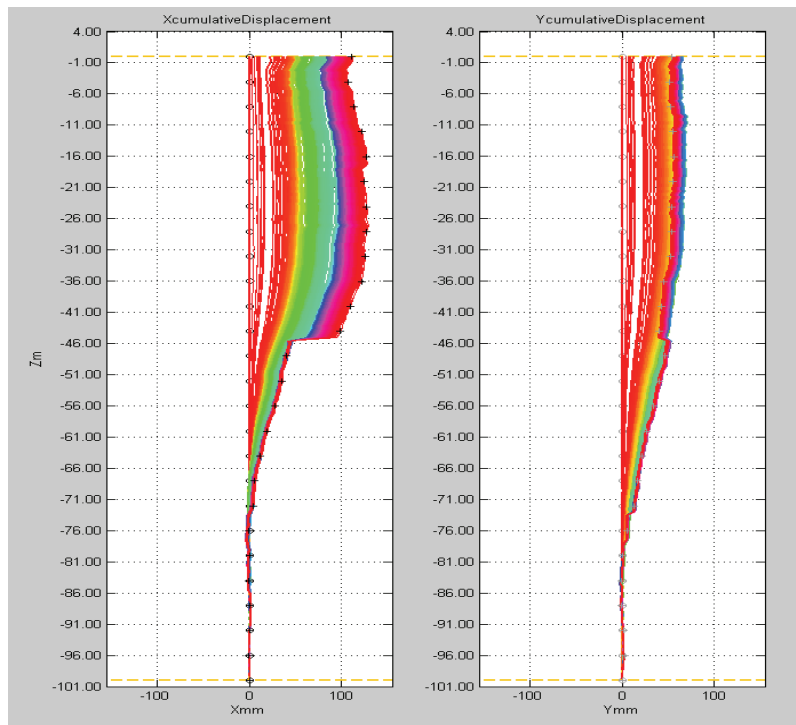
cie umieszczonego na głębokości 30 m (rys. 5). Szytne półmetrowe segmenty pomiarowe połączone ruchomymi przegubami mogą przemieszczać się w dowolnym kierunku, lecz są zabezpieczone przed skręcaniem. Jeden segment zawiera trzy czujniki w zakresie pomiarowym 45° , przy dokładności pomiaru $0,02 \text{ mm}\cdot\text{m}^{-1}$. Czujnik temperatury gruntu jest umiejscowiony w co czwartym segmencie. Rejestrator i system transmisji danych

GPRS są zasilane przez panel słoneczny i mają dostęp on-line. Pomiary są rejestrowane co 6 h od 19 grudnia 2016 roku. Wyniki uzyskane od 20 grudnia 2016 do 5 września 2017 roku wykazały, że największe skumulowane przemieszczenia w kierunku X (nachylenie stoku) osiągnęły wielkość 78 mm, a w kierunku Y (prostopadły) 60 mm (rys. 6).

Przemieszczenia wglębne występowały do głębokości 73 m. Największe



RYSUNEK 6. Wyniki monitoringu, przemieszczenia wglębne X, Y w czasie
 FIGURE 6. Monitoring results, X, Y displacements in time



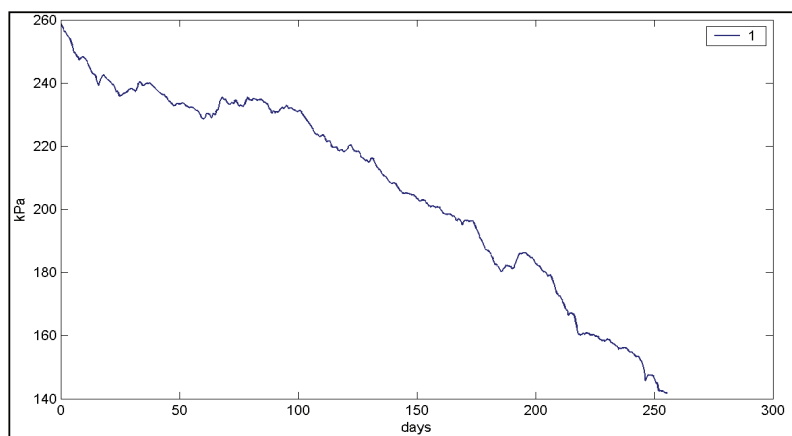
RYSUNEK 7. Wyniki monitoringu, skumulowane przemieszczenia w głębie
 FIGURE 7. Monitoring results, cumulated ground displacements

skumulowane przemieszczenia w kierunkach X i Y zanotowano na głębokościach 0–45 m (rys. 7). Największe przemieszczenia w kierunku nachylenia zbocza zaobserwowano w pierwszych 40 dniach pomiarów w lutym 2017 roku, gdy osiągały one 50 mm, i sierpniu/wrześniu 2017 roku, kiedy to zwiększyły się o kolejne 40 mm. Ich kierunek był w przybliżeniu zgodny z nachyleniem zbocza. Całkowity wypadkowy wektor przemieszczeń wyniósł 110 mm. Wartość początkowa ciśnienia porowego wynosząca 258 kPa na głębokości 30 m zmniejszyła się do 140 kPa (rys. 8). Przeszczenia w głębszych warstwach podłoża były spowodowane prawdopodobnie złożonymi czynnikami, w tym wypiętrzaniem pokładów węgla,

na które wpływ miała działalność górnicza oraz wysad solny. Wprowadzone ustawienie wartości alarmowych zostało zdefiniowane z użyciem wcześniejszych tego typu danych z KWB Belchatów na 30 mm dziennie. Do tej pory (tzn. do listopada 2017 r.) nie zaobserwowano takich wartości.

Wdrożenie innych metod monitoringu zachodniego zbocza KWB Belchatów

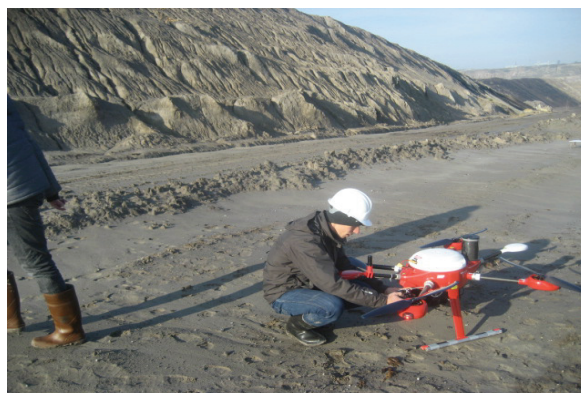
Projekt Euracoal SLOPES obejmuje także inne rodzaje monitoringu, takie jak satelitarne skanowanie radarowe PSI w wysokiej rozdzielczości (dokładność



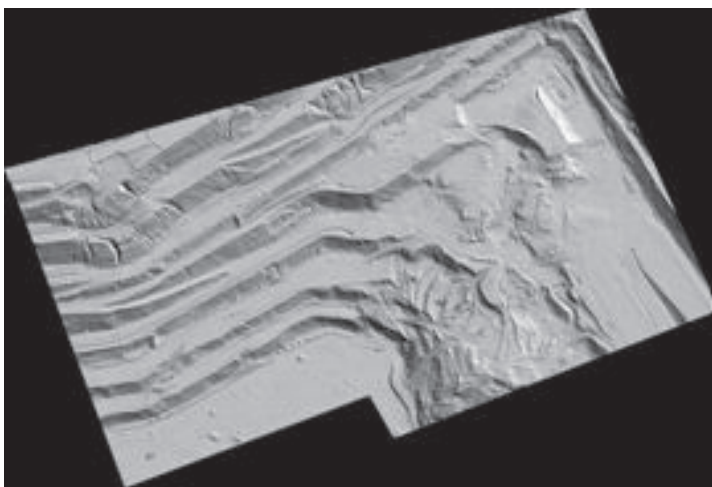
RYSUNEK 8. Wyniki monitoringu, ciśnienie porowe w gruncie na głębokości 30 m
 FIGURE 8. Monitoring results, pore pressure at 30 m depth

5–10 mm), naziemne skanowanie laserowe i skanowanie LiDAR z użyciem drona (UAV). Satelitarne skanowanie radarowe jest prowadzone przez Poltegor-Institut we współpracy z GAP (spółka Politechniki Bari, Włochy). W latach 2016–2018 zamówiono 50 obrazów radarowych o wysokiej rozdzielczości w kwadracie 40×40 km. Pierwsze wyniki analiz zostaną przedstawione w lutym 2018 roku. Współpraca między Ineris (Francja), Yellow Scan (Francja) i MSP (Polska) pozwoliła na wykonanie pomiarów tech-

niką LiDAR-UAV na zachodnim zboczu KWB Bełchatów (rys. 9–10). W ramach tego zadania zrealizowano w październiku i listopadzie 2016 roku dwie kampanie pomiarowe UAV. Uniwersytet Exeter wykonał w 2016 roku naziemne skanowanie laserowe zachodniego zbocza z czterech lokalizacji: dwóch na południowym zboczu i dwóch na północnym z użyciem lasera Rigel-VZ4000. Uzyskane wyniki posłużą do interpretacji i kalibracji przemieszczeń gruntu w pobliżu miejsca monitoringu on-line.



RYSUNEK 9. Skanowanie LiDAR-UAV na poziomie +42 m n.p.m., KWB Bełchatów
 FIGURE 9. LiDAR-UAV scanning at level +42 m a.s.l., Bełchatów Lignite Opencast Mine



RYSUNEK 10. Wyniki skanowania LiDAR-UAV na poziomie +42 m n.p.m., KWB Belchatów
 FIGURE 10. The results of LiDAR-UAV scanning at level +42 m a.s.l., Belchatów Lignite Opencast Mine

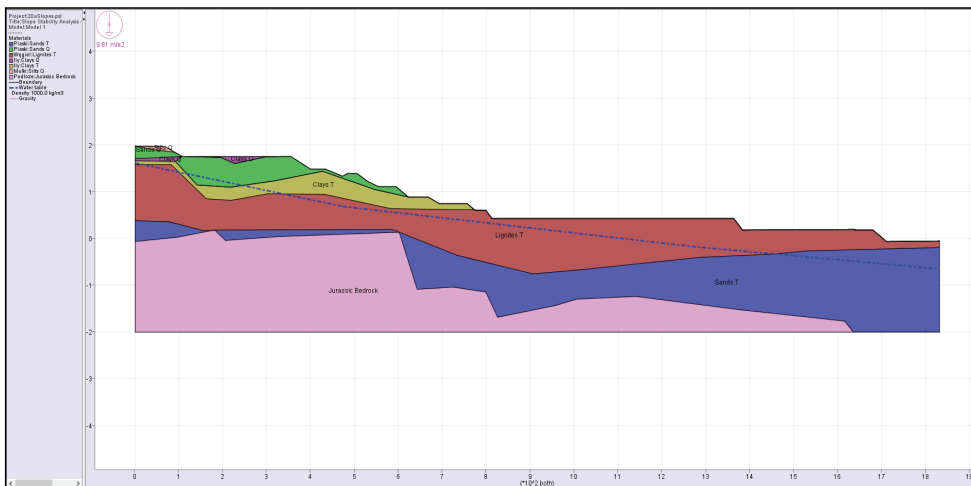
Modelowanie numeryczne zachodniego zbocza KWB Belchatów

Analizy stateczności badanego terenu ze względu na jego złożoną strukturę geologiczną wymagały uogólnienia wprowadzonego modelu zachodniego zbocza odkrywki. W tym celu wydzielono warstwy charakteryzujące się podobnymi parametrami wytrzymałościowymi. Przy interpretacji wyprowadzonych wartości obliczeniowych wytrzymałości efektywnej wykorzystano zalecane przez Eurokod 7 tzw. doświadczenie porównywalne. Parametry wytrzymałościowe zastosowane do obliczeń (tabela) przyjęto na podstawie skorygowanych wartości z poprzednich badań i modelowania (Poltegor-Projekt, 2002; Bednarczyk, 2017b). Metoda korekty w odniesieniu do efektywnych parametrów obliczeniowych została oszacowana z użyciem wcześniejszych ocen i metod (Phoon

i Kulhawy, 1999; Batog i Hawrysz, 2013). W przypadku skał mezozoicznych parametry określono za pomocą klasyfikacji GSI (Marinos i Hoek, 2005). Przykładową geometrię wydzielonych warstw przedstawiono na rysunku 11. Stateczność zbocza analizowano za pomocą programu Flac 8.0 2D w dwóch przekrojach poprzecznych (18 WE i 20 WE) poprowadzonych w liniach największego spadku. Siatka obliczeniowa miała wymiary 1×1 m i obejmowała 50 000 kroków obliczeniowych. Zastosowany model konstytutywny gruntu *linear elastic* zawierał przybliżoną głębokość występowania zwierciadła wód gruntowych. Wprowadzone parametry wytrzymałościowe przedstawiono w tabeli. Wyniki modelowania wskazują na duże ryzyko osuwiskowe na zachodnim zboczu. Potwierdzają to obserwacje terenowe i monitoring. Należy dodać, że analizy są szacunkowe, gdyż nie uwzględniają wpływu struktury solnej.

TABELA. Parametry wytrzymałościowe uwzględnione w analizie numerycznej
 TABLE. Strength parameters implemented in the numerical analysis

Rodzaj grunów/skał Soil/rock type	ρ [kg·m ⁻³]	c' [kPa]	ϕ' [°]
Piaski / Sand (Q)	1850	1,0	30,0
Gliny zwałowe / Glacial loam (Q)	2180	40,0	9,16
Pyły / Silts (Q)	2130	40,0	15,00
Iły / Clays (Q)	2080	80,0	5,33
Iły / Clays (N)	2110	89,0	5,81
Węgiel brunatny / Lignite (N)	1180	170,0	14,80
Piaski / Sands (N)	1950	1,0	32,00
Skały mezozoiczne / Mesozoic rocks (M)	2500	338,0	27,13



RYSunEK 11. Analiza stateczności zbocza, linia 20 WE, wybrane warstwy geotechniczne
 FIGURE 11. Slope stability analysis 20 WE, selected geotechnical layers

Było to spowodowane stosunkowo dużą odległością od wysadu (w skali siatki obliczeniowej dla zbocza) i brakiem reprezentatywnych danych dla wysadu do obliczeń.

Uzyskane współczynniki stateczności były niekorzystne i wahały się od 0,85 w przekroju 18 WE, w pobliżu występującego osuwiska, do 1,14 w przekroju sekcji 20 WE (rys. 12). W złożonych warunkach geotechnicznych

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. Planowana analiza z wykorzystaniem metod FEM będzie uwzględniać obserwowane wartości przemieszczeń.



RYRSUNEK 12. Analiza stateczności zbocza, linia 20 WE, $F_s = 1,14$

FIGURE 12. Slope stability analysis 20 WE, $F_s = 1.14$

Wnioski i uwagi końcowe

W artykule omówiono projekt Eurocoal SLOPES oraz wyniki dotychczasowych badań wykonanych w Polsce. Badania w odkrywce KWB Bełchatów stwierdziły przemieszczenia wgłębne na zachodnim zboczu wywołane oddziaływaniem eksploatacji górniczej oraz prawdopodobnie wpływem naprężeń pochodzących od wysadu solnego. Dzięki nowej, pierwszej w polskiej kopalni odkrywkowej instalacji monitoringu osuwisk on-line stwierdzono przemieszczenia wgłębne o wielkości do 110 mm w ciągu pierwszych 12 miesięcy pomiarów i przemieszczenia głębszych pokładów węgla brunatnego poniżej poziomu -3 m n.p.m. Zarejestrowane przemieszczenia wystąpiły na skutek spadku ciśnienia porowego o ponad 100 kPa. Wstępne modelowanie numeryczne ujawniło istnienie niekorzystnego stopnia stateczności zbocza

i jego podatność na procesy osuwiskowe. Przemieszczenia mogą być aktywne na powierzchniach strukturalnych i gruntach ilastych o słabej wytrzymałości w kontakcie z pokładami węgla brunatnego. Modelowanie numeryczne zboczy kopalni odkrywkowych charakteryzujących się bardzo złożonymi warunkami geotechnicznymi jest zazwyczaj podobne i ma wiele ograniczeń wynikających z charakteru struktury geologicznej złoża. Monitoring powinien sprawdzić, w jaki sposób wyniki modelowania będą odpowiadać warunkom rzeczywistym. Nowy system on-line będzie można wykorzystać do wczesnego ostrzegania o zagrożeniach. Dane te zostaną uzupełniane wykonywanymi obecnie pomiarami PSI, UAV i badaniami laboratoryjnymi. Wpływ osuwisk na bezpieczeństwo i efektywność eksploatacji odkrywkowej węgla brunatnego jest zazwyczaj bardzo duży. Badania, monitoring i modelowanie w ramach projektu Eura-

coal SLOPES powinny pomóc w lepszej identyfikacji ryzyka oraz ułatwić wybór optymalnych metod ograniczania zagrożeń geotechnicznych przy eksploatacji węgla brunatnego.

Podziękowania

Autor pragnie wyrazić swoją wdzięczność Agencji UE Euracoal oraz Ministerstwu Nauki i Szkolnictwa Wyższego za finansowanie projektu SLOPES RFCR-CT-2015-00001, a podziękowania kieruje do PGE GIEK SA oddział Bełchatów za zaangażowanie i pomoc w zaprezentowanych badaniach.

Literatura

- Bednarczyk, J. i Nowak, A. (2010). Strategie i scenariusze perspektywicznego rozwoju produkcji energii elektrycznej z węgla brunatnego w świetle występujących uwarunkowań. *Górnictwo i Geoinżynieria*, 34(4), 67-83.
- Bednarczyk, Z. (2017a). Landslide Monitoring and Counteraction Technologies in Polish Lignite Opencast Mines. W M. Mikoz, V. Vilimek, Y. Yin, K. Sassa (red.), *Advancing Culture of Living with Landslides*. Vol. 5. *Landslides in Different Environments* (strony 33-43). Basel: Springer International Publishing AG.
- Bednarczyk, Z. (2017b). Slope Stability Analysis for the Design of a New Lignite Open-Pit Mine. *Procedia Engineering*, 191, 51-58.
- Ciuk, E. i Piwocki, M. (1980). *Geologia trzeciorzędu w rowie Kleszczowa i jego otoczeniu*. Przewodnik LII Zjazdu PTG. Warszawa: Wydawnictwo Geologiczne.
- Czarnecki, L., Organiściak, B., Krywult, L. i Chrost, A. (2010). Stateczność zachodniego zbocza stałego wyrobiska Kopalni Bełchatów w świetle obserwacji geologicznych i pomiarów specjalistycznych z uwzględnieniem rejonu wysadu solnego. *Górnictwo i Geoinżynieria*, 34, 173-182.
- Cruden, D.M. i Varnes, D.J., (1996). Landslide types and processes. W A.K. Turner, G.P. Schuster (red.), *Landslides, investigation and mitigation*. Vol. 3. Special report 24 (strony 36-75). Washington: Transportation Research Board.
- Jonczyk, W., Organiściak, B. i Sedor, A. (2013). Ograniczanie zagrożeń osuwiskowych dla poprawy bezpieczeństwa robot gorniczych na przykładzie Kopalni Bełchatów. W *Materiały Konferencyjne „Szkoła Górnictwa Odkrywkowego 2013”*. Kraków: Wydawnictwo Akademii Górniczo-Hutniczej.
- Batog, A. i Hawrysz, M. (2013). Projektowanie budowli ziemnych w skomplikowanych i złożonych warunkach geotechnicznych. *Geoinżynieria, Drogi, Mosty, Tunele*, 3, 34-43.
- Kasztelwicz, Z. (2012). Węgiel brunatny na świecie i w Polsce. *Węgiel Brunatny*, 1(78), 7-13.
- Marinos, V.P. i Hoek, E. (2005). The Geological Strength Index: applications and limitations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64, 55-65.
- Patrzyk, J. (1996). Zagrożenie osuwiskowe w KWB Bełchatów. *Mies. WUG*, 2(96), 13-16.
- Phoon, K. i Kulhawy, F.H. (1999). Characterization of geotechnical variability. *Canadian Geotechnical Journal*, 36, 612-624.
- Poltegor-Projekt (2002). *Aktualizacja ZTE Pola Szczercow wraz z biznesplanem. Wydobywanie maksymalne. Część Ogólna. Nr projektu – 1030.1325.002*. Wrocław.
- PN EN 1997-1:2008. Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.
- PN-EN 1997-2:2009. Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 2: Rozpoznawanie i badanie podłoża gruntowego.
- Rybicki, S. (1996). Zjawiska osuwiskowe w krajowych kopalniach węgla brunatnego, ich skala, charakter i uwarunkowania. W *Materiały Sesji Naukowej „Problemy geotechniczne w praktyce inżynierskiej”* (strony 157-164). Kraków: Instytut Geotechniki Politechniki Krakowskiej.

Streszczenie

Nowoczesne metody monitoringu geotechnicznego w polskich odkrywkowych kopalniach węgla brunatnego. W artykule

przedstawiono badania w ramach unijnego projektu Euracoal SLOPES, który jest realizowany przez partnerów z sześciu krajów europejskich. Koordynatorem projektu jest Centrum Geomechaniki Uniwersytetu Nottingham (UK). Badania geotechniczne wykonywane w Polsce na zachodnim zboczu tzw. Pola Bełchatów Kopalni Węgla Brunatnego Bełchatów obejmowały zaawansowany system on-line monitoringu inklinometrycznego i piezometrycznego o głębokości 100 m. Uzupełniały go naziemny skaning laserowy, skanowanie dronem w technice LiDAR i badania laboratoryjne. Uzyskane wyniki wykorzystano w modelowaniu numerycznym stateczności zbocza. Powinno to umożliwić na lepsze przewidywanie zagrożeń osuwiskowych oraz przetestowanie nowych metod badań.

Summary

Advanced geotechnical engineering monitoring methods in Polish opencast lignite mines. The article presents research carried out within the framework of the Eu-

ropean Union project Euracoal SLOPES. The project is conducted by the partners from six European countries and coordinated by the Geomechanics Center of Nottingham University. Geotechnical research performed in Poland, on the western slope of the Bełchatów Lignite Mine so-called Bełchatów Field included an advanced on-line system of inclinometer and piezometer monitoring of 100 m depth. It was supplemented by ground based laser scanning, LiDAR scanning with the usage of drone and laboratory tests. The results obtained were used for numerical modeling of the slope stability. This should allow for a better prediction of landslide risks and the testing of new research methods.

Author's address:

Zbigniew Bednarczyk
Instytut Górnictwa Odkrywkowego
„Poltegor-Instytut”
51-616 Wrocław, ul. Parkowa 25
Poland
e-mail: zbyzbed@gmail.com