

PRZEGLĄD GÓRNICZY

założono 01.10.1903 r.

MIESIĘCZNIK STOWARZYSZENIA INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW GÓRNICTWA

Nr 11

(1164)

listopad 2019

Tom 75 (LXXV)

Metody badań i oceny stateczności – wyzwania i trendy: Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki na 100-lecie AGH

Methods of research and slope stability analysis – challenges and trends:
Department of Geomechanics, Civil Engineering & Geotechnics in the century
of AGH UST



*Prof. dr hab. inż. Marek Ciało**



*Prof. dr hab. inż. A. Tajduś**



*Dr inż. Agnieszka Stopkiewicz**



*Mgr inż. Malwina Kolano**



*Dr inż. Michał Kowalski**



*Mgr inż. Joanna Jakóbczyk**



*Dr inż. Katarzyna Cyran**



*Mgr inż. Justyna Adamczyk**



*Mgr inż. Mateusz Blajer**

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, WGiG w Krakowie

Treść: W artykule przedstawiono problematykę oceny stateczności skarp i zboczy. Przybliżono rozwój prac badawczych realizowanych w Katedrze Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki w tym zakresie. Zaprezentowano wybrane przykłady prac badawczych koncentrujących się na ocenie stateczności zboczy wyrobisk odkrywkowych. Wskazano wyzwania i trendy w metodach oceny stateczności.

Abstract: This article presents problematic aspects of the assessment of slope and slope/flank stability. It describes development of research work carried out on this topic in the Department of Geomechanics, Civil Engineering and Geotechnics. Selected examples of research works focused on the assessment of the slope stability of opencast excavations are presented. Article also stipulates challenges and trends in stability assessment methods.

Słowa kluczowe:

stateczność skarp i zboczy, obliczenia numeryczne, metody równowagi granicznej, metoda redukcji wytrzymałości na ścinanie (SSR), Zmodyfikowana metoda redukcji wytrzymałości na ścinanie (MSSR)

Keywords:

slope stability, numerical calculations, Limit Equilibrium Methods (LEM), Shear Strength Reduction Method (SSR), Modified Shear Strength Reduction Method (MSSR)

1. Wprowadzenie

Analiza stateczności skarp i zboczy, zarówno naturalnych jak i powstałych w wyniku działalności człowieka, jest jednym z najważniejszych zadań mechaniki gruntów i geotechniki. Problematyka stateczności zboczy jest szczególnie istotna w górnictwie odkrywkowym, gdzie wykonuje się wykopy o gigantycznych, gdzie indziej nie spotykanych, głębokościach i nasypy (zwały) o znacznych wysokościach. Wystąpienie osuwisk na obiektach tej wielkości może prowadzić do katastrof o nieobliczalnych konsekwencjach. Nic więc dziwnego, że osuwiska zboczy zwałowisk i wyrobisk zaliczane są do głównych zagrożeń naturalnych występujących w górnictwie odkrywkowym.

Należy podkreślić, że całkowite wyeliminowanie zagrożeń osuwiskowych w górnictwie odkrywkowym nie jest możliwe ze względu na warunki technologiczne i ekonomiczne, które wykluczają stosowanie skarp o łagodnych nachyleniach oraz piętér o ograniczonej wysokości. W związku z tym, w niektórych rejonach dopuszcza się nawet do wystąpienia osuwisk o ograniczonych gabarytach, w ramach tzw. ryzyka górniczego, a w otoczeniu ważnych obiektów projektuje się geometrię zbocza tak, aby zminimalizować prawdopodobieństwo wystąpienia osuwisk.

Zagadnienie stateczności od dawna stanowi przedmiot zainteresowań wielu badaczy. Pierwsze naukowe prace z tej dziedziny pojawiły się w XVIII wieku, a ich autorem był Coulomb (1777). Gwałtowny rozwój metod analizy stateczności obserwuje się na początku XX wieku, kiedy to opracowano fundamentalne i do dziś stosowane metody analizy, takie jak Pettersona (1916), Felleniusa (1925), Terzagiego (1925). W latach 50. i 60. ubiegłego wieku powstają metody Masłowa (1949), Taylora-Bishopa (1954), Janbu (1956), Nonveillera (1965), Morgensterna i Price'a (1963) i Spencera (1967). Pomimo tak licznych badań do chwili dzisiejszej nie udało się stworzyć teorii rozwiązującej w sposób pełny i jednoznaczny problematykę stateczności (Abramson i in. 1996). Przyczyną takiego stanu rzeczy jest duża liczba czynników wpływających na warunki stateczności oraz trudności w określaniu stanu naprężenia, odkształcenia i przemieszczenia dla skarpy.

Przyczyny powodujące utratę stateczności skarp i zboczy są bardzo skomplikowane. Najogólniej mówiąc, są nimi siły ciężkości wywołane przyciąganiem ziemskim oraz pochodzące od nich naprężenia. Na rozkład naprężeń w masywie gruntowym wpływ ma szereg dodatkowych czynników, których

nawet dokładne określenie jest bardzo trudne. Najważniejsze z nich to (Cała, 2007c):

- kształt i wymiary skarpy,
- budowa geologiczna, a szczególnie istnienie nieciągłości w postaci powierzchni kontaktowych i powierzchni zaburzeń tektonicznych,
- woda, która powoduje występowanie ciśnienia hydrostatycznego i spływowego,
- warunki atmosferyczne,
- obciążenia dynamiczne, wywołane ruchem pojazdów i pracą maszyn, robotami strzałowymi, trzęsieniami ziemi etc.,
- wpływy chemiczne i biologiczne.

Dodatkowym czynnikiem utrudniającym rozwiązanie zagadnienia stateczności skarp są problemy natury matematycznej, związane z rozwiązywaniem równań opisujących związku między tensorami naprężenia i odkształcenia w ośrodku gruntowym dla skomplikowanych warunków brzegowych właściwych dla skarp. Wszystko to jest przyczyną, że do chwili obecnej nie uzyskano rozwiązania analitycznego, opisującego rozkład naprężeń w skarpie, nawet dla prostszych, wyidealizowanych modeli.

Dla analizy stateczności skarp i zboczy w kopalniach odkrywkowych używa się zwykle metod równowagi granicznej (LEM – Limit Equilibrium Method). Najczęściej wykorzystywane są metody Felleniusa, Bishopa, Janbu oraz Morgensterna-Pricea. Zastosowanie LEM wymaga przyjęcia szeregu założeń upraszczających. Należy między innymi sprecyzować kształt i położenie powierzchni poślizgu oraz podzielić potencjalną bryłę osuwiskową na bloki (paski). W zależności od stosowanej metody przyjmuje się odmienne założenia dotyczące sił wzajemnego oddziaływania na bocznych powierzchniach bloków.

Interesującą alternatywą dla LEM jest zastosowanie metod numerycznych. Zakłada się w nich najczęściej, że zbocze zbudowane jest z ośrodka sprężysto-plastycznego oraz stosuje jedną ze znanych metod rozwiązywania równań różniczkowych, takich jak: metoda różnic skończonych (MRS), metoda elementów skończonych (MES) lub metody mieszane.

Zagadnieniami stateczności skarp i zboczy jako pierwsi zajmowali się na AGH Stanisław Korman i Ryszard Rzepisko. Praca doktorska R. Rzepisko (której promotorem był S. Korman) dotyczyła kinematyki pełzania roboczych skarp zwałów w kopalni węgla brunatnego turów. Dalsze prace dotyczyły badań wytrzymałości na ścinanie gruntów zwałowych w warunkach terenowych (Flisiak i in. 1972, 1974) i statecz-

ności skarp stałych w kopalniach odkrywkowych (Korman i in. 1978). Kolejne prace doktorskie dotyczące zagadnień stateczności skarp i zboczy w górnictwie odkrywkowym pojawiają się na Wydziale Górnictwa i Geoinżynierii (wtedy Wydziale Górniczym) na początku lat 80. XX wieku. Flisiak (1981) badał przebieg procesów osuwiskowych nadkładowych skarp roboczych KWB „Bełchatów” w oparciu o terenowe pomiary przemieszczeń, zaś Mazurek (1981) zajmował się analizą parametrów osuwisk nadkładowych skarp wykopów wybranych kopalń odkrywkowych. Po tych doktoratach pojawiają się kolejne prace dotyczące zagadnień stateczności zboczy i zagrożenia osuwiskowego (Mazurek, 1982, 1984, 1986, 1987a,b), które są jednym z impulsów do szerszego wykorzystania możliwości komputerów klasy IBM PC.

Już w latach 80. w Katedrze Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki (KGBiG) opracowano (w języku FORTRAN na komputery IBM PC XT i IBM PC AT) Bibliotekę Programów St (Stateczność skarp i boczny), której autorem był J. Flisiak (Flisiak i in. 1978). Końcem lat 80. każdy student specjalności Geomechanika górnicza sam przeliczał swój projekt zbocza na (jedynym dostępnym wtedy) komputerze typu IBM PC (w pokoju J. Flisiaka, który nieustannie znajdował w sobie niewyczerpane pokłady cierpliwości obserwując wyczyny studentów, niekiedy pierwszy raz siedzących za klawiaturą). Jednego z nich tak zafascynowały te zagadnienia, że zajmuje się nimi do dzisiaj (M. Cała).

W latach 90. zajmowano się zagadnieniami stateczności zboczy w pobliżu budowli hydrotechnicznych (Mazurek i Thiel, 1991; Mazurek i in. 1998) oraz geotechnicznymi aspektami likwidacji odkrywkowych kopalń siarki (Rybicki i in. 1987).

Koniec XX wieku i początek XXI to zdecydowany postęp w aplikacji metod numerycznych w zagadnieniach stateczności skarp i zboczy. W Katedrze Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki na Wydziale Górnictwa i Geoinżynierii AGH realizowanych jest szereg prac dla przemysłu oraz powstaje cykl publikacji poświęconych stateczności zboczy (Cała i Flisiak, 2000, 2001, 2002). Prezentowano w nich różne aspekty stosowania metody redukcji wytrzymałości na ścinanie (SSR – Shear Strength Reduction). Metoda ta jest najpopularniejszą techniką numeryczną określania wskaźnika stateczności zboczy (FS – Factor of Safety) oraz położenia krytycznej powierzchni poślizgu. SSR posiada jednakże istotne ograniczenia, albowiem w podstawowej konfiguracji

wyznacza tylko jedną powierzchnię poślizgu charakteryzującą się najmniejszą wartością wskaźnika stateczności

W 2003 roku powstała zmodyfikowana metoda redukcji wytrzymałości na ścinanie (MSSR – Modified Shear Strength Reduction Method), której pomysłodawcami byli M. Cała i J. Flisiak (2003 a,b,c). W kolejnych latach problematyką stateczności skarp i zboczy zajmuje się coraz większa grupa pracowników Katedry Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki, co objawia się w kolejnych publikacjach (Cała 2007a,b,c, 2009a,b, 2013, Cała i in. 2004a,b,c, 2006a,b,c, 2007, 2009, 2011a, 2012, 2013, 2014a, 2016, 2017a, Stopkowicz, Cała 2004, 2007; Cała, Olesiak 2007; Cała, Kowalski 2008, Cała, Betlej 2010, Mazurek, Cała 2011, Adamczyk i in. 2013; Jakóbczyk i in. 2015). W ostatnich latach w zakresie stateczności skarp i zboczy zostały zrealizowane dwie prace doktorskie: Kowalski (2014) i Stopkowicz (2019), obie wykonane zostały pod kierunkiem prof. M. Cały. Praca Kowalskiego (2014) koncentrowała się na opracowaniu metodyki oceny warunków stateczności skarp o złożonej geometrii i budowie geologicznej. Stopkowicz (2019) w pracy doktorskiej podjęła problem stateczności skarp nasypów kolejowych i opracowała autorską klasyfikację stateczności nasypów kolejowych (SNK). Pracownicy Katedry są także autorami *Wytycznych do oceny stateczności skarp i zboczy na potrzeby budownictwa drogowego* (Cała i in. 2018a), zrealizowanych w ramach projektu naukowego „Nowoczesne metody rozpoznania podłoża gruntowego w drogownictwie”, w ramach wspólnego przedsięwzięcia Rozwój Innowacji Drogowych (RID).

Istotnym elementem badań prowadzonych w Katedrze Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki jest ocena właściwości skał i gruntów, odpadów, a także analogów materiałów kosmicznych, czego wyrazem są publikacje (Kolano, Mazurek 2013, Seweryn i in. 2014, Małkowski 2015, Olesiak 2015, 2017; Hydzik-Wiśniewska i in., 2018, Blajer i in. 2019, Hydzik-Wiśniewska J., Pękala A. 2019) oraz nieustannie rozwijane nowoczesne laboratoria:

- Certyfikowane Laboratorium Badania Własności skał i Wyrobów kamieniarskich. Laboratorium posiada akredytację na oznaczanie 48 różnych wielkości charakteryzujących właściwości skał zwięzłych, kruszyw mineralnych i gruntów.
- Laboratorium Badań Geotechnicznych. Laboratorium świadczy usługi w zakresie: badań geotechnicznych dla potrzeb prac naukowych, rozpoznawczych, dokumentacyj-



Stanowisko do badań trójosiowych gruntów



Stanowisko do badań właściwości odkształceniowych gruntów

Fot. 1. Laboratorium wytrzymałościowo-odkształceniowe gruntów
Photo. 1. Soil strength and deformation laboratory

nych i kontrolnych, odbioru wykonanych robót ziemnych, wykonywania opinii, dokumentacji geotechnicznych oraz ekspertyz w zakresie geotechniki.

- Laboratorium Badań Pozniszczeniowych. Posiadana aparatura umożliwia przeprowadzenie niszczących badań wytrzymałościowych dla skał oraz wysokiej wytrzymałości betonów. Badania mogą być prowadzone w warunkach jednoosiowego i trójosiowego (osiowo-symetrycznego) obciążenia.
- Laboratorium Wytrzymałościowo-Odkształceniowe Gruntów. Posiadana aparatura umożliwia wykonywanie badań właściwości wytrzymałościowych gruntów, w tym badania bezpośredniego ścinania (na próbkach do 30 cm x 30 cm), trójosiowe badania statyczne i dynamiczne oraz badania właściwości odkształceniowych i filtracyjne gruntów.

Pracownicy Katedry nieustannie podnoszą swoje umiejętności i poszerzają wiedzę w zakresie zagadnień szeroko rozumianej geotechniki. Wyrazem dużego doświadczenia Pracowników KGBiG są liczne prace badawcze realizowane dla kopalń odkrywkowych z Polski, ale też z zagranicy w tym np. z Norwegii, Wietnamu, czy Sierra Leone. W aktualnie realizowanych przez pracowników KGBiG pracach badawczych wykorzystuje się zaawansowane narzędzia obliczeniowe 2D i 3D, często łącząc je z nowoczesnymi metodami badań właściwości ośrodka. W kolejnym podpunkcie przedstawione zostaną wybrane przykłady prac realizowanych w KGBiG.

2. Wybrane przykłady zastosowania płaskich (2D) i przestrzennych (3D) analiz stateczności w kopalniach odkrywkowych

Pracownicy Katedry Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki prowadzą prace naukowo-badawcze oraz prace przemysłowe w zakresie zagadnień szeroko rozumianej geotechniki. Szczególnie ważnym obszarem działalności Katedry jest współpraca z przemysłem i realizowanie wsparcia kopalń odkrywkowych w celu zapewnienia bezpiecznych warunków eksploatacji z zapewnieniem optymalnego wykorzystania złoża. W ramach tej działalności pracownicy Katedry zrealizowali szereg prac. Poniżej zostaną wymienione wybrane

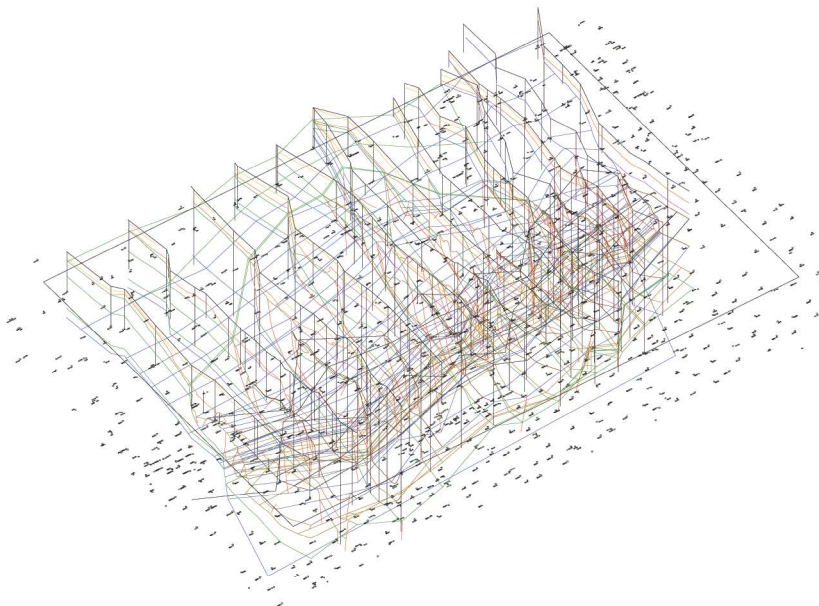
przykłady ostatnio realizowanych badań.

Przykład 1. Analiza wpływu prowadzenia robót górniczych w rejonie, charakteryzującym się zwiększonym tempem oraz zasięgiem rejestrowanych deformacji wgłębnych i powierzchniowych

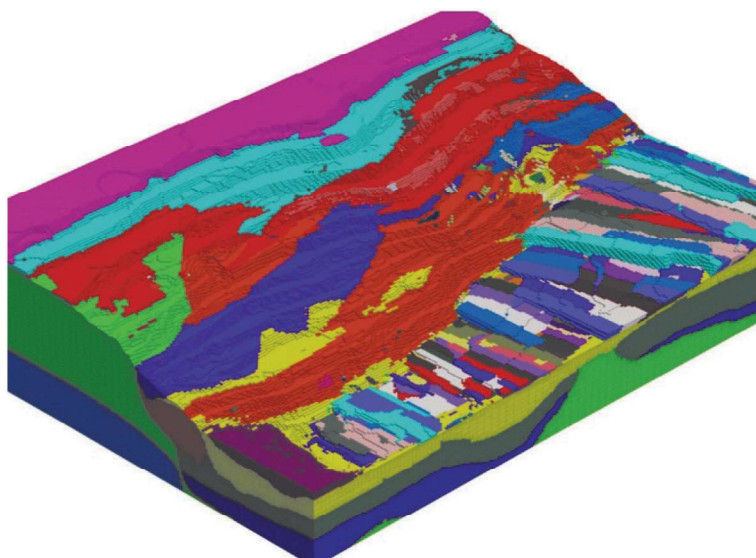
Jednym z zagrożeń geotechnicznych, z którym mamy do czynienia w górniczych wyrobiskach odkrywkowych jest możliwość rozwoju procesów deformacyjnych prowadzących do utraty stateczności zbocza. Bezpośrednio z tym zagadnieniem związany jest projekt zrealizowany dla jednej z kopalń odkrywkowych, mający na celu opracowanie zasad bezpiecznego prowadzenia robót górniczych w rejonie, charakteryzującym się zwiększonym tempem oraz zasięgiem rejestrowanych deformacji wgłębnych i powierzchniowych.

Realizacja powyższego celu wymagała prowadzenia bieżących analiz zmian tempa deformacji na podstawie wielkości kinematycznych (przemieszczeń i prędkości) wyznaczanych na podstawie pomiarów powierzchniowej sieci obserwacyjnej (reperów geodezyjnych) oraz wgłębnych przemieszczeń poziomych obserwowanych w inklinometrach. Równolegle realizowane były zaawansowane obliczenia numeryczne z wykorzystaniem oprogramowania FLAC3D v. 6.00 bazującego na metodzie różnic skończonych. Budowa geologiczna w modelu numerycznym zbocza odwzorowana została na podstawie kilkunastu przekrojów geologicznych oraz informacji uzyskanych z licznych otworów badawczych (rys. 1). Kalibrację modelu przeprowadzono na podstawie przemieszczeń rejestrowanych przez repery geodezyjne. Model zbudowany (rys. 2) został z około 1.9 miliona elementów i umożliwiał przeprowadzanie wariantowych obliczeń w przestrzennym stanie naprężenia, pozwalających na ocenę wpływu projektowanych prac górniczych na warunki stateczności zbocza, a tym samym wspierał proces opracowania rozwiązania optymalnego.

Realizacja prac górniczych, skutkująca stopniowym odciążaniem zbocza oraz zwiększaniem generalnego kąta jego nachylenia, spowodowała uaktywnienie procesów deformacyjnych o tempie dotychczas niespotykanym. Maksymalna chwilowa prędkość przemieszczeń osiągnęła wartości od 573 do 884 mm/dobę (rys. 3), czemu towarzyszył rozwój szczelin i spękań. Jednocześnie nie doszło do gwałtownej utraty



Rys. 1. Przekroje geologiczne wykorzystane do budowy modelu numerycznego
Fig.1. Geological cross-sections used to building of the numerical model

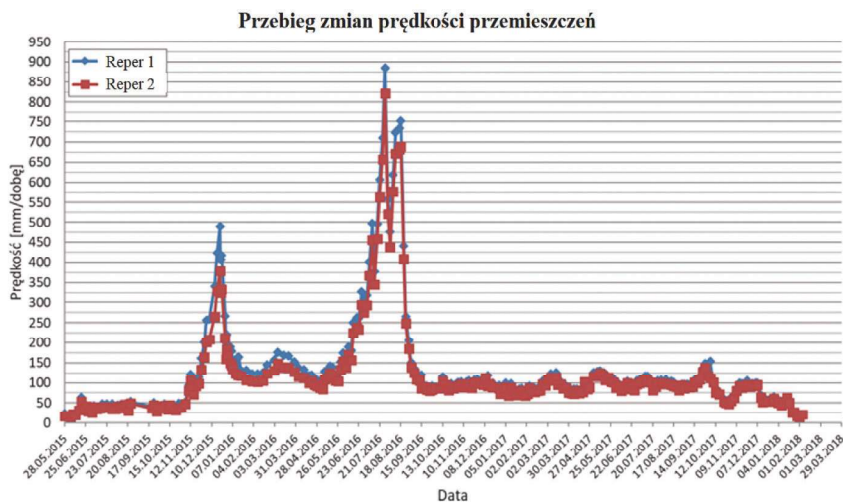


Rys. 2. Przestrzenny model numeryczny z wydzielonymi warstwami geotechnicznymi

Fig. 2. 3D numerical model with marked geotechnical layers

stateczności zbocza. Przemieszczenia całkowite wyniosły od 61 do 134 metrów, zaś maksymalne odnotowane całkowite wypiętrzenie wyniosło 62 metry w przeciągu dwóch i pół roku. W związku z tak znaczącymi przemieszczeniami, doszło do

przeprofilowania zbocza, co zostało uwzględnione na poszczególnych etapach analiz numerycznych dzięki zastosowaniu zdjęć z fotogrametrii lotniczej, pozwalających na aktualizację geometrii zbocza (rys. 4, 5).



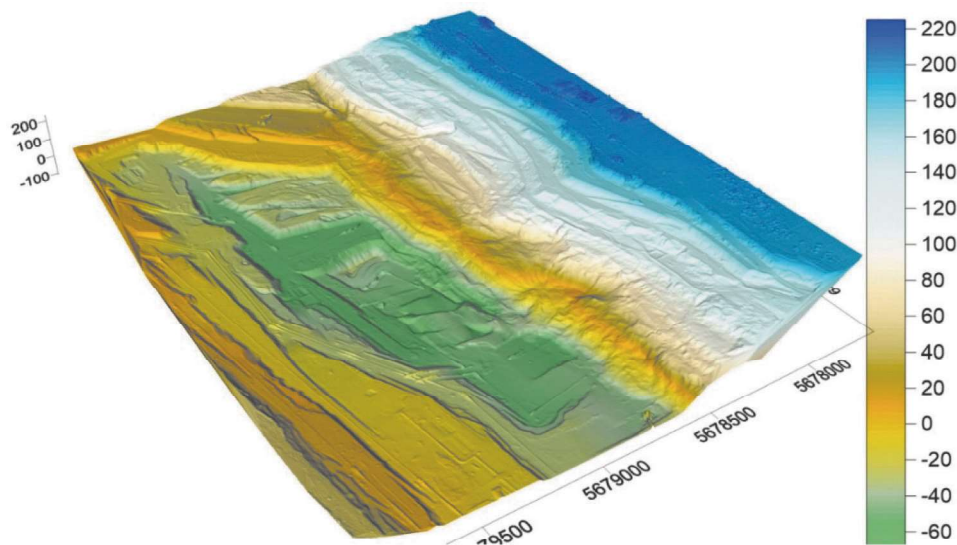
Rys. 3. Wykres prędkości przemieszczeń

Fig. 3. Velocity-time graph



Rys. 4. Obraz wyrobiska górniczego uzyskany z fotogrametrii lotniczej

Fig. 4. A picture of the open-pit mine based on the air photogrammetry



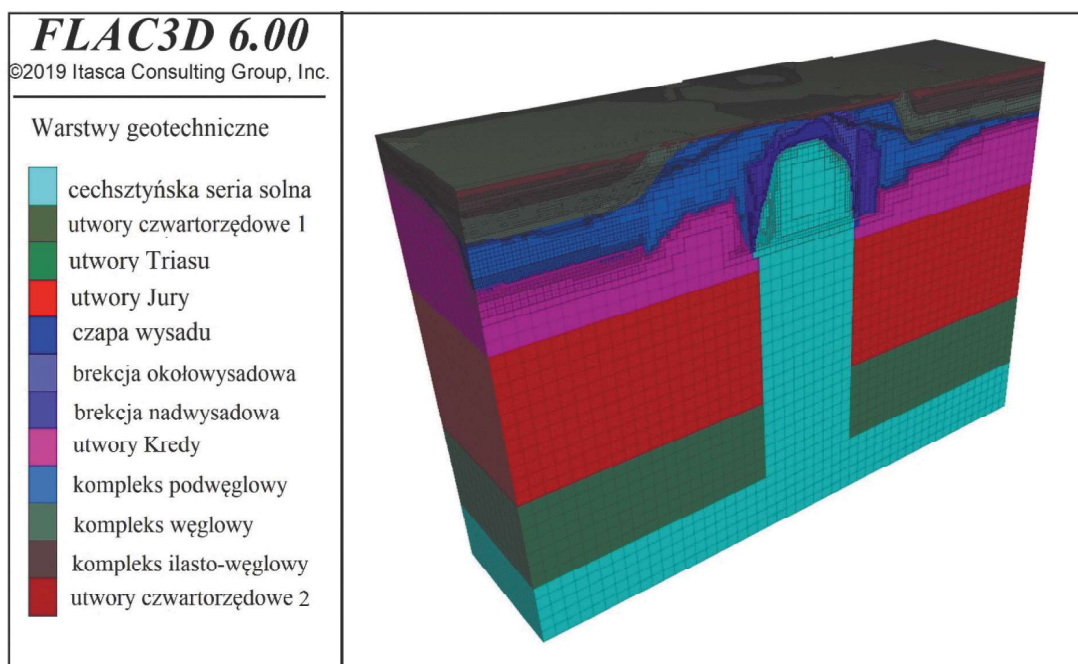
Rys. 5. Kształt powierzchni zbocza uzyskany na podstawie fotogrametrii lotniczej
Fig. 5. A geometry of the open-pit mine surface based on the air photogrammetry

Wykorzystanie Metody Obserwacyjnej (Terzaghi, Peck, 1967. CIRIA Report 185, 1999), zakładającej ciągłą modyfikację realizowanego projektu w oparciu o informacje uzyskiwane z bieżących pomiarów i obserwacji kinematyki zbocza oraz sprzężenie jej z symulacjami numerycznymi pozwoliło w rezultacie na sterowanie procesem eksploatacji i realizację zakładanego wydobycia z zachowaniem bezpieczeństwa pracy.

Przykład 2. Analiza wpływu długoterminowej eksploatacji węgla brunatnego w kopalni Bełchatów na wysad solny Dębina

Kolejny przykład prac realizowanych w Katedrze Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki to analiza wpływu długoterminowej eksploatacji węgla brunatnego w kopalni Bełchatów na wysad solny Dębina (Cała i in. 2014b, 2018b). Podzielona na kilka etapów analiza obejmowała lata

2006-2018. W każdym z etapów, wykorzystując modelowanie numeryczne, prognozowano reakcję masywu skalnego i wysadu solnego na procesy związane z robotami górniczymi i wybieraniem węgla brunatnego na zboczu zachodnim pola górniczego Bełchatów. Obliczenia numeryczne wykonano w programie FLAC3D v. 6.00 (Itasca Consulting Group), opartym na metodzie różnic skończonych. Przestrzenny model numeryczny wysadu solnego Dębina, zachodniego zbocza pola Bełchatów i obszarów przyległych został zbudowany na podstawie 28 przekrojów geologicznych i składał się z 5 milionów elementów (rys. 6). Wymiary modelu to: długość 4000 m, szerokość 2000 m i wysokość 2600 m. Parametry fizyczne i mechaniczne warstw geotechnicznych uwzględnionych w modelu numerycznym, zostały wyznaczone na podstawie testów laboratoryjnych.



Rys. 6. Model numeryczny w rejonie wysadu Dębina (Cała i in. 2018b)

Fig. 6. Numerical model in the area of Dębina salt dome (Cała et al., 2018)

Problematyka stateczności w rejonie wysadu solnego Dębina jest kwestią złożoną ze względu na skomplikowaną budowę geologiczną i zróżnicowanie parametrów mechanicznych utworów. Wysad dzieli złożo węgla brunatnego Bełchatów na dwa pola eksploatacyjne (rys. 7): pole Bełchatów i pole Szczerców (Dąbrowska 1978, Hałaszcak 2004). W polu Bełchatów eksploatacja jest prowadzona w bezpośrednim otoczeniu wysadu, natomiast w polu Szczerców roboty górnicze zlokalizowane są w znacznej odległości od wysadu (ok. 2 km). W związku z tym, w opracowaniu uwzględniono tylko wpływ eksploatacji prowadzonej w polu Bełchatów.

Profil litostratygraficzny w rejonie wysadu Dębina uwzględnia następujące utwory: jurajskie i kredowe margle, piaskowce, wapienie, mułowce, trzeciorzędowe osady kompleksu węglowego i podwęglowego oraz czwartorzędowe gliny zwałowe, mułki, fluwiogłacjalne osady piaszczysto-żwirowe oraz piaski i mułki zastoiskowe. Analizowany obszar charakteryzuje się skomplikowaną budową będącą wynikiem wielofazowych ruchów tektonicznych o charakterze regionalnym, dynamiki struktur solnych oraz procesów sedymentacyjnych i glacialnych.

Prognoza wpływu eksploatacji węgla brunatnego na wysad solny Dębina obejmowała następujące elementy: analizę stanu naprężeń, przemieszczeń poziomych i pionowych oraz stopnia wyżeżenia (Cała i in. 2014b, 2018b). W symulacjach numerycznych wzięto pod uwagę geometrię frontu eksploatacji oraz jego pozycję i zmiany w czasie w stosunku do wysadu solnego, a także objętość wybranych mas skalnych. Wykonane metodą modelowania numerycznego prognozy (Cała i in. 2014b, 2018b) zostały w kolejnych latach potwierdzone przez pomiary geodezyjne powierzchni nad wysadem oraz pomiary deformacji wgłębnych (pomiary inklinometryczne) prowadzone na zboczu zachodnim pola Bełchatów. Należy podkreślić, że zrealizowane opracowanie stanowi przykład kompleksowego podejścia do złożonego problemu geotechnicznego obejmującego skomplikowaną geometrię zbocza, warunki geologiczne i górnicze oraz różnorodność parametrów geomechanicznych.

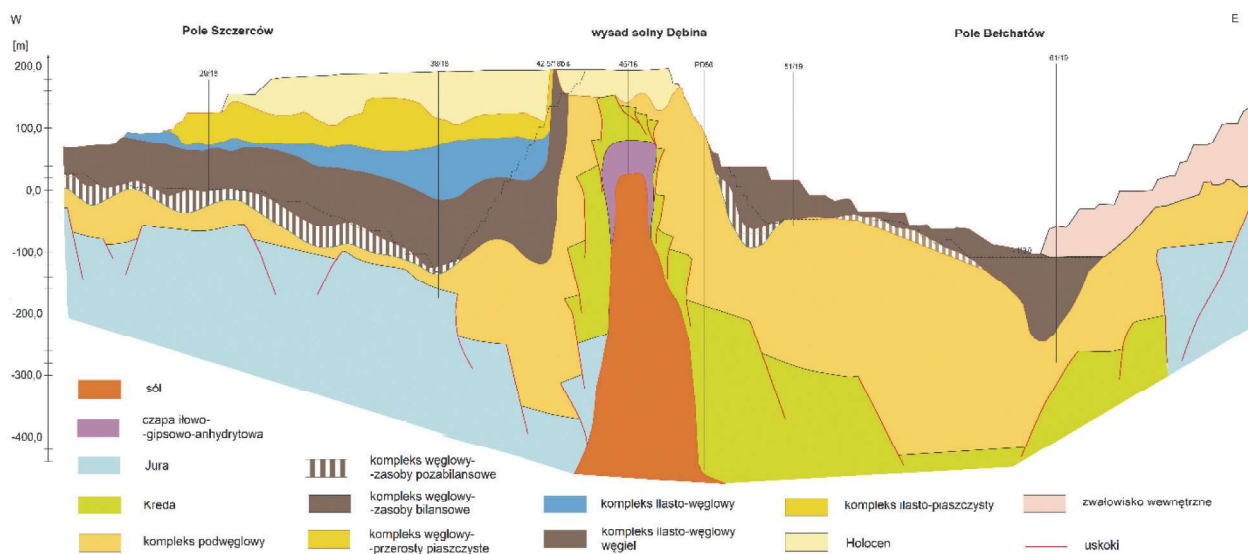
Przykład 3. Ocena warunków stateczności wyrobiska złoża wapieni dewońskich Ostrówka

Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki prowadzi badania dotyczące zachowania się ośrodka skalnego. Jednym z kierunków badań w tym zakresie jest ocena stateczności zboczy skalnych. Analiza stateczności zboczy skalnych jest zagadnieniem szczególnie trudnym. Ośrodek skalny charakteryzuje się dużym stopniem naturalnej niejednorodności (fot. 2, 3), a wpływ na jego właściwości i zachowanie mają licznie występujące nieciągłości i spękania. Ocena stateczności zboczy skalnych wymaga uwzględnienia nieciągłości i ich właściwości, a także ich przebiegu w stosunku do geometrii (rys. 1). Jednym z przykładów takich analiz jest wykonana dla Nordkalk Sp. z o. o. (Zakład Górniczy Miedzianka) ocena warunków stateczności wyrobiska złoża wapieni dewońskich Ostrówka (fot. 2).

W celu oceny warunków stateczności wykonano serię badań laboratoryjnych w celu określenia właściwości wytrzymałościowych wybranych utworów. W kolejnym etapie prac przeprowadzono kartowanie geologiczne istotnych zaburzeń tektonicznych ze wskazaniem miejsc zagrożonych (fot. 2). Wszystko to posłużyło do opracowania modeli numerycznych w których odwzorowano geometrię stwierdzonych nieciągłości, a także ich właściwości. Właściwości nieciągłości zostały skalibrowane na podstawie prowadzonych obserwacji zachowania się ośrodka. Wykonane serie obliczeń numerycznych pozwoliły na ocenę aktualnych warunków stateczności oraz określenie warunków stateczności dla geometrii docelowej wyrobiska (rys. 8, 9).

Przykład 4. Analiza stateczności wyrobiska kopalni odkrywkowej Hytttemalmen, Norwegia

Jedną z ciekawszych prac była analiza stateczności wyrobiska kopalni odkrywkowej Hytttemalmen zlokalizowanej w północnej części Norwegii. W kopalni tej w roku 2010 pojawiły się problemy ze statecznością zboczy skutkujące dużym obrywem skalnym fragmentu rampy zjazdowej oraz kilkoma mniejszymi obrywami w innych rejonach odkrywki. Masyw skalny charakteryzował się wysokimi parametrami wytrzymałościowymi, które jednak na skutek intensywnych prac strzałowych ulegały znacznemu osłabieniu. Obliczenia numeryczne przeprowadzone zostały w programie FLAC3D v. 4.0 (Itasca Consulting Group) opartym na metodzie różnic skończonych, przy wykorzystaniu zmodyfikowanej metody



Rys. 7. Przekrój geologiczny w rejonie wysadu solnego Dębina (na podstawie Hochman i in., 2000; Widera, 2016)

Fig. 7. Geological cross-section in the area of Dębina salt dome (based on Hochman i in., 2000, Widera, 2016)



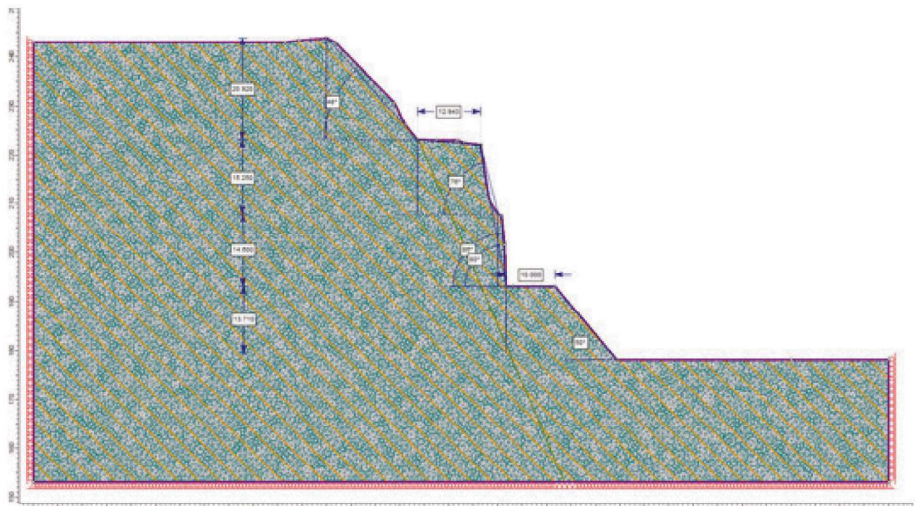
Fot. 2. W środku ściany gwałtowna zmiana nachylenia warstw wzdłuż rdzawej pionowej dyslokacji 165/85W (czerwone strzałki). Na zachód od dyslokacji (w prawo za schronem 7) nieco skrasowiałe, rdzawe powierzchnie warstwowania o upadach do 70°. Tuż na wschód od dyslokacji nachylenie spada skokowo do 095/46N, a całkiem na wschód znajduje się mały zsuw 095/43N (Cała i in. 2017b)

Photo. 2. The rapid change in a dip along the rusty-red vertical dislocation 165/85W (red arrow) is visible in the middle of the wall. To the west from the dislocation (on the right, behind the shelter), slightly weathered, rusty-red surfaces of laminas dip at 70°. To the east from the dislocation the inclination decreases rapidly to 095/46N and further to the east there is small slide to 095/43N (Cała i in. 2017b)



Fot. 3. Leje i kanały krasowe wypełnione materiałem ilastym – ślíz międzyławicowy (Cała i in. 2017b)

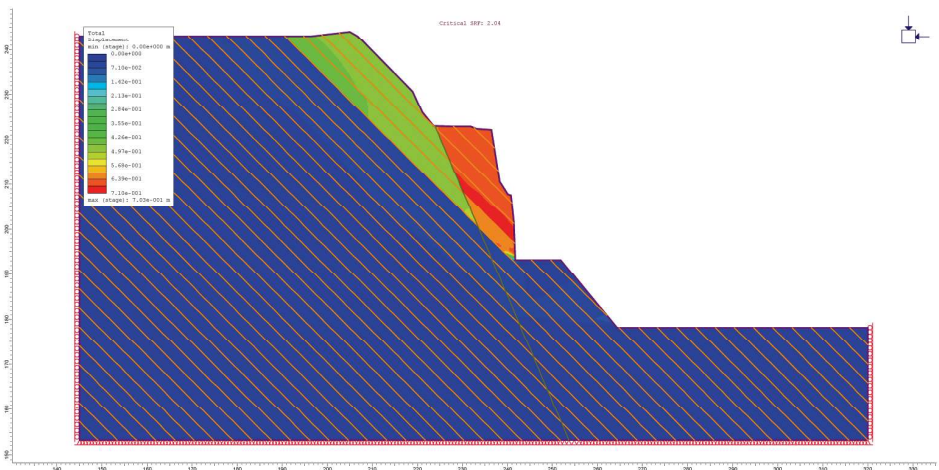
Photo. 3 Sinkhole and karst channels filled with clay – slide between shoals (Cała i in. 2017b)

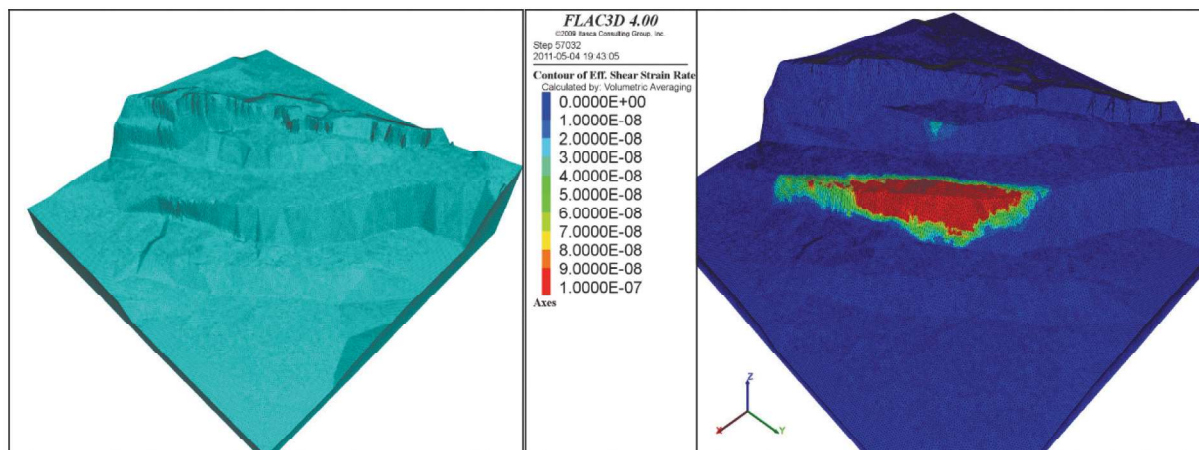


Rys. 8. Model obliczeniowy, półka bezpieczeństwa 10 m (Cała i in. 2017b)
Fig. 8. Calculation model, 10 m safety shelf (Cała i in. 2017b)

Rys. 9. Przebieg powierzchni poślizgu określony na podstawie przemieszczeń całkowitych, FS=2,04 (Cała i in. 2017b)

Fig. 9. The course of the slip surface determined on the basis of total displacements, FS=2,04 (Cała i in. 2017b)





Rys. 10. Model numeryczny analizowanego fragmentu rampy zjazdowej w odkrywce Hyttemalmen (Cała, Kowalski 2011)

Fig. 10. The numerical model of the ramp in Hyttemalmen open-pit mine (Cała, Kowalski 2011)

redukcji wytrzymałości na ścinanie (Cała, 2007a). W pierwszym etapie analizy wykonano model rampy zjazdowej na której wystąpił główny obryw (rys. 10). Model ten posłużył do wyznaczenia parametrów wytrzymałościowych metodą analizy odwrotnej.

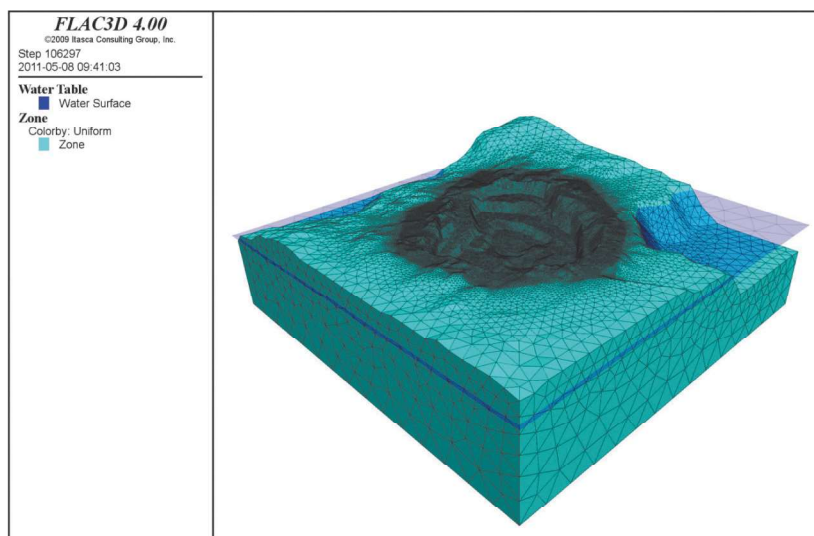
W kolejnym etapie przygotowano przestrzenny model numeryczny całej odkrywki dla stanu aktualnego oraz projektowanego stanu docelowego. Ze względu na analizowany obszar i znaczne wymiary modelu, konieczne okazało się uwzględnienie dwóch zbiorników wodnych znajdujących się w otoczeniu analizowanej odkrywki – jednego naturalnego oraz drugiego sztucznego, utworzonego po likwidacji położonej w pobliżu odkrywki. W modelu uwzględniono również zmienność parametrów wytrzymałościowych masywu skalnego wraz z głębokością. Model ten przedstawiono na rysunku 11. Analiza dla stanu na marzec 2011 nie wykazała istotnych problemów ze statecznością zboczy odkrywki. Następnie analizie poddano projektowany docelowy kształt odkrywki, w efekcie której stwierdzono znaczne zagrożenie dla utrzymania stateczności – wartości wskaźników stateczności niebezpiecznie zbliżyły się do jedności, podczas gdy

dla kopalni odkrywkowych przyjmuje się najczęściej jako wartość minimalną $FS = 1,3$.

Wobec powyższego przeprowadzono wariantowe obliczenia, na które składało się m.in. zmniejszenie kąta nachylenia dolnych skarp odkrywki. W efekcie uzyskano wymaganą wartość wskaźnika stateczności, wariant ten charakteryzował się jednak znacznymi stratami kopaliny użytecznej. Celem optymalizacji wydobycia wykonano kolejny etap analizy z zachowaniem pierwotnych kątów nachylenia dolnych skarp, ale z obniżeniem zwierciadła wody w zbiorniku powstałym po zalaniu poprzedniej odkrywki. Zmiany takie pozwoliły na uzyskanie wymaganego zapasu bezpieczeństwa (rys. 12), optymalizując wydobytą ilość kopaliny (Cała i in. 2014a).

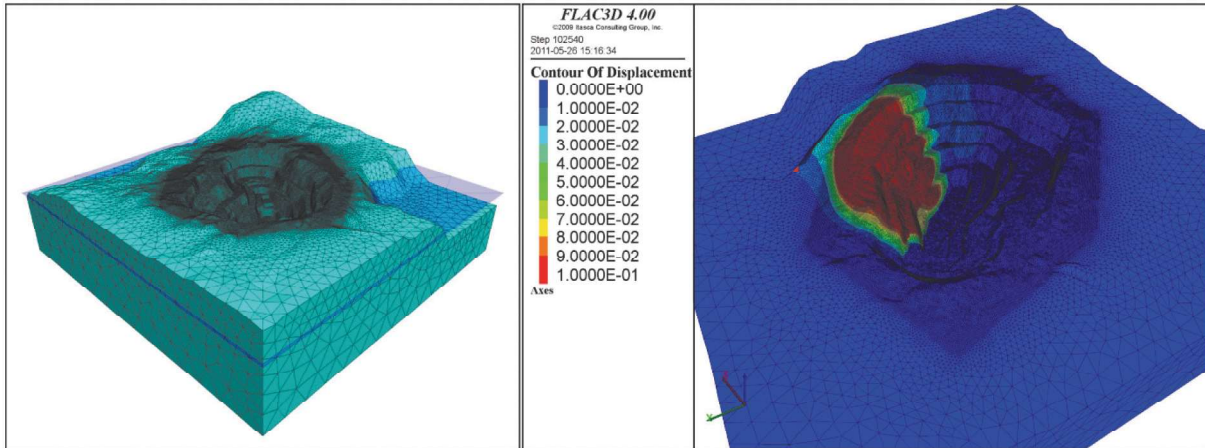
Przykład 5. Analiza przyczyn awarii fragmentu nasypu, autostrada A-4

Interesującym przykładem wykorzystania metod numerycznych w zagadnieniach związanych z geotechniką była analiza przyczyn awarii fragmentu nasypu autostrady A-4. Celem obliczeń było określenie i wyjaśnienie możliwości



Rys. 11. Model numeryczny odkrywki Hyttemalmen dla stanu aktualnego na czas analizy – marzec 2011 roku

Fig. 11. The numerical model of Hyttemalmen open-pit mine for the state in March 2011



Rys. 12. Model numeryczny odkrywki Hytttemalmen dla zaprojektowanego stanu docelowego z uwzględnieniem obniżenia zwierciadła wody, wskaźnik stateczności FS = 1,30

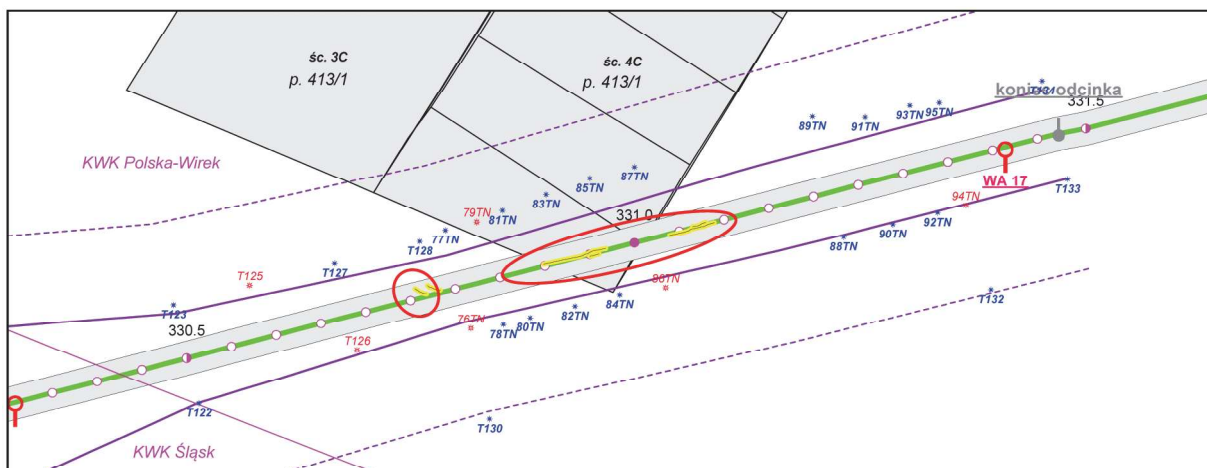
Fig. 12. The numerical model of Hytttemalmen open-pit mine for the target state with regard to a drop in the water level, safety factor FS=1.30

powstania spękań i szczelin pionowych w koronie nasypu autostrady A-4 na odcinku znajdującym się pomiędzy węzłami „Wirek” - „Batorego” na terenie Rudy Śląskiej. Zagadnienie to było przedmiotem analiz m.in. w publikacji (Cała i in. 2006c). Na odcinku tym autostrada zlokalizowana jest na wysokim nasypie, uformowanym na podłożu o nachyleniu około 10% w kierunku północno-zachodnim, zgodnym z normalną do osi autostrady. Wysokość nasypu w rejonie awarii przekraczała 10 m (przy skarpie północnej), a nachylenie skarp, zarówno północnej jak i południowej, było zbliżone do 1:1.5 (ok. 34°). W rejonie awarii występowały skomplikowane warunki gruntowe, a budowla zaliczona została do III kategorii geotechnicznej. Nasyp wykonany był głównie z gruntów urobionych przy wykonywaniu wykopów z nim sąsiadujących.

Nasyp przedmiotowego odcinka autostrady znajdował się bezpośrednio ponad krawędzią ściany węglowej, której eksploatacja odbywała się już po wykonaniu nasypu (rys. 13). We wrześniu 2004 r. stwierdzono stan awaryjny nasypu autostrady na odcinku w rejonie km 330.900, skutkujący m.in. powstaniem spękań o rozwarości do kilku cm oraz głębokości do dwóch metrów.

Dla analizowanego zagadnienia zbudowano przestrzenny model numeryczny w programie FLAC3D v. 6.0. Następnie, korzystając z hipotezy Budryka-Knothe'go, uzyskano parametry deformacji powierzchni terenu dla rozpatrywanej eksploatacji ściany, której krawędź dochodzi pod kątem do osi przedmiotowego nasypu autostradowego. Parametry deformacji posłużyły do zdefiniowania warunków brzegowych modelu poprzez procedurę, która zakłada w węzłach modelu numerycznego odpowiednie wartości prędkości na krok obliczeniowy. Po wykonaniu określonej liczby kroków uzyskano w efekcie sytuację, w której model nasypu poddawany był deformacjom, jak gdyby znajdował się na terenie eksploatacji górniczej (rys.14).

Po przeprowadzeniu obliczeń uzyskano wyniki dobrze odpowiadające zaistniałej w rzeczywistości sytuacji. W koronie nasypu we fragmencie znajdującym się nad krawędzią eksploatowanej ściany 4C doszło do znacznych poziomych odkształceń o charakterze rozciągającym, osiągających wartość ok. 5 mm/m – w sytuacji, gdy maksymalne wartości odkształceń poziomych na powierzchni terenu wg hipotezy Budryka-Knothe'go wynosiły ok. 3 mm/m. Co więcej,



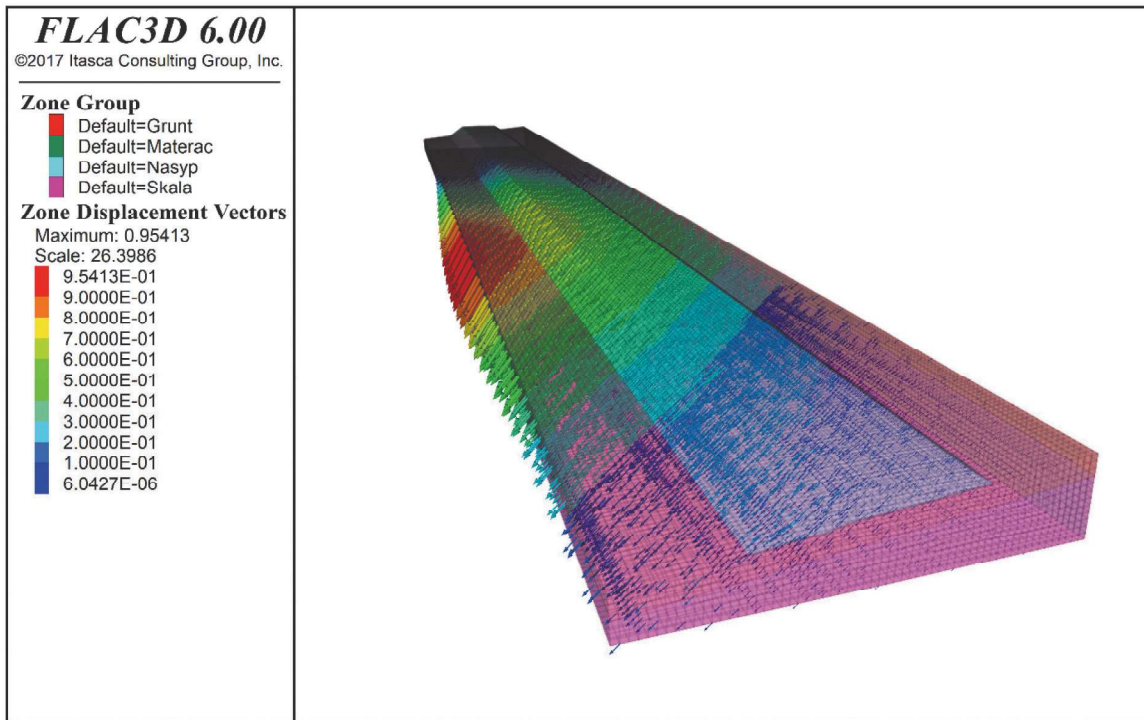
Rys. 13. Położenie krawędzi ścian 3C i 4C w stosunku do analizowanego odcinka autostrady A-4 oraz zaznaczone miejsca uszkodzeń nasypu (czerwone elipsy)

Fig. 13. The location of 3C and 4C wall edge in relation to the analysed part of A4 motorway. The damaged area are circled in red

w koronie nasypu i w jego północnym korpusie stwierdzono występowanie znacznych odkształceń postaciowych, które mają kluczowe znaczenie dla zachowania stateczności takich obiektów jak nasypy i wykopy drogowe (rys. 15).

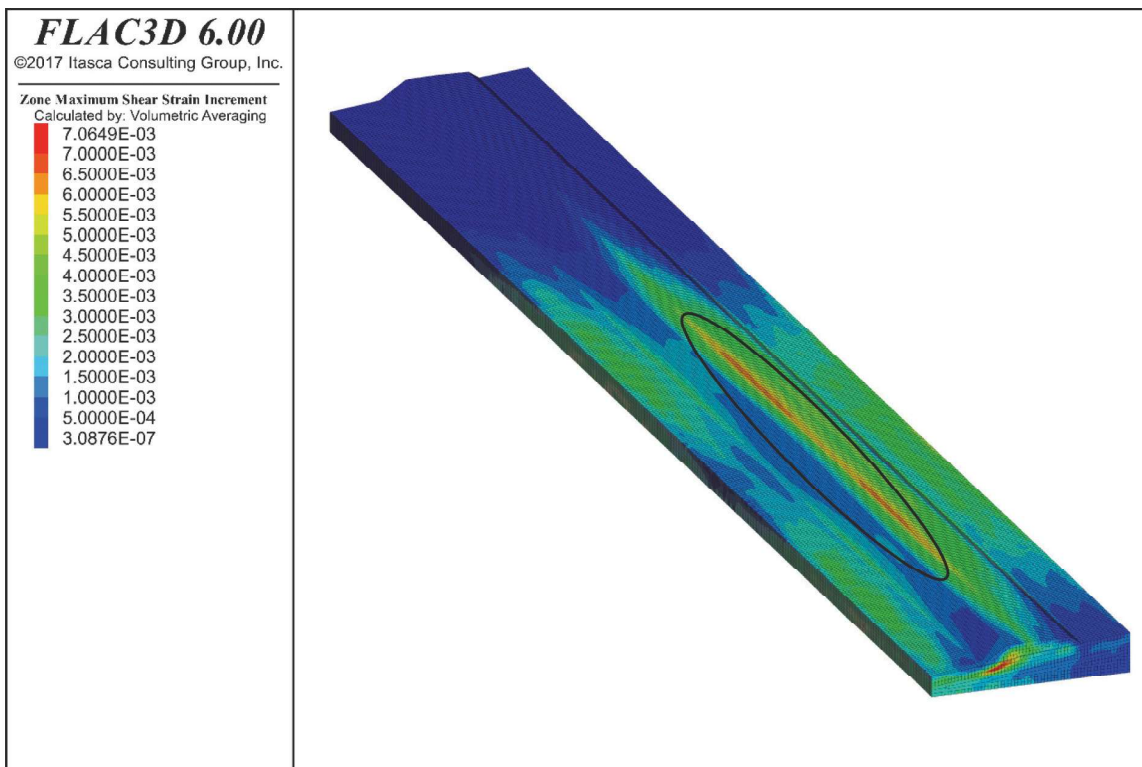
W efekcie stwierdzono, że korzystając z przestrzennej metody obliczeniowej można z dużą dokładnością odwzoro-

wać zagadnienie posadowienia obiektu w skomplikowanych warunkach gruntowych. Przeprowadzenie podobnej analizy, ale z wykorzystaniem dwuwymiarowej analizy numerycznej, pozwala stwierdzić przyczyny i przebieg zjawiska, natomiast nie umożliwia dokładnej oceny lokalizacji i zasięgu powstałych zjawisk.



Rys. 14. Wektory przemieszczeń po wyeksploatowaniu ściany 4C (widok ogólny)

Fig. 14. The displacement vector after extraction of 4C wall (general view)



Rys. 15. Mapa maksymalnych odkształceń postaciowych (60 m do pełnego wyeksploatowania ściany 4C)

Fig. 15. A map of maximal shear strains (60 m from extracted 4C wall)

3. Podsumowanie

Problematyka stateczności skarp i zboczy jest zagadnieniem wciąż aktualnym. Postępująca eksploatacja, rosnąca głębokość oraz prędkość wydobywania, sięganie po złoża w rejonach o skomplikowanej budowie geologicznej, wszystko to powoduje, że do oceny warunków stateczności przestają wystarczać podstawowe metody badawcze i obliczeniowe. Złożoność zagadnień wymaga kompleksowych analiz pozwalających na sprzężenie metod obliczeniowych z pomiarami monitoringu. W efekcie, coraz częściej, ocena warunków stateczności wyrobisk odkrywkowych wymaga zastosowania nowoczesnych metod obliczeniowych i metod numerycznych 2D i 3D. W celu bieżących prognoz niezbędne okazuje się włączenie dodatkowego parametru jakim jest czas i wykonanie obliczeń 2D z uwzględnieniem czasu, bądź też obliczeń 3D z uwzględnieniem czasu. Można stwierdzić, że już niebawem dla oceny warunków stateczności kopalń odkrywkowych będą niezbędne metody 4D (3D + czas). Dodatkowo metody obliczeniowe muszą być wsparte dobrymi badaniami właściwości wytrzymałościowo-odkształceniowych, w tym z uwzględnieniem właściwości dynamicznych. Równie istotne jest powiązanie nowoczesnych metod monitoringu z modelowaniem numerycznym i oceną warunków stateczności. Na te wyzwania Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki jest już przygotowana.


Literatura

- ABRAMSON L.W., THOMAS S.L., SHARMA S., BOYCE G.M. 1996 - Slope stability and stabilization methods, John Willey & Sons Inc., New York.
- ADAMCZYK J., CAŁA M., FLISIAK J., KOLANO M., KOWALSKI M. 2013 - Slope stability analysis of waste dump in Sandstone Open Pit Osielec. *Studia Geotechnica et Mechanica*; ISSN 0137-6365. 2013 vol. 35 no. 1, s. 3–17. Bibliografia s. 17, Abstract.
- BLAJER M., STOPKOWICZ A., ADAMCZYK J., CAŁA M. 2019 - The preliminary research of the physico-mechanical properties of aggregates based on the colliery shale, supplemented by fly ash. *Archives of Mining Sciences*; ISSN 0860-7001. 2019 vol. 64 no. 1, s. 21–34. - Bibliografia s. 32–34. - tekst: <http://archiwum.img-pan.krakow.pl/index.php/AMS/article/download/1161/867>.
- CAŁA M. 2007a - Numeryczne metody analizy stateczności zboczy. Wydawnictwa AGH. Seria Rozprawy i Monografie. Nr. 171.
- CAŁA M. 2007b - Trójwymiarowa analiza stateczności zboczy z zastosowaniem metody redukcji wytrzymałości na ścinanie: Analiza numeryczna propagacji fal oraz stateczności zboczy (Cała M., Dobrociński S., Łydźba D.). Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. ISBN: 978-83-7493-306-3. S. 59–90. Bibliografia s. 83–89.
- CAŁA M. 2007c - Convex and concave slope stability analyses with numerical methods. *Archives of Mining Sciences*; ISSN 0860-7001. 2007 vol. 52 iss. 1, s. 75–89. Bibliografia s. 87–89. tekst: <http://archiwum.img-pan.krakow.pl/index.php/AMS/article/view/484/493>.
- CAŁA M. 2009a - Numerical slope stability and displacement analysis: Rizika v inženýrské geologii : sborník I. národního inženýrskogeologického kongresu s mezinárodní účastí : 31.8–3.9.2009 Ostrava / editoři: Pašek J., Marschalko M., Pospíšil P. Ostrava : VŠB–Technická univerzita, [2009]. Współopr. z. Voda–strategická surovina : sborník 10. Česko-Slovenského mezinárodního hydrogeologického kongresu. ISBN: 978-80-248-2026-2. S. 63–68. Bibliografia s. 67–68, Abstract.
- CAŁA M. 2009b - Numeryczna analiza procesu utraty stateczności skarp z uwzględnieniem przemieszczeń ośrodka: Problemy geotechniczne i środowiskowe z uwzględnieniem podłoża ekspansywnych. praca zbiorowa pod red. Dembickiego E., Kumora M.K., Lechowicza Z.; Polski Komitet Geotechniki, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy. Katedra Geotechniki. Bydgoszcz : Wydawnictwo Uczelniane UTP, 2009. ISBN: 978-83-61314-84-4. S. 19–26. Bibliografia s. 25.
- CAŁA M. 2013 - Analiza stateczności skarp i zboczy w 2D i 3D. Nowoczesne rozwiązania konstrukcyjno-materiałowo-technologiczne: geotechnika: XXVIII Ogólnopolskie warsztaty pracy projektanta konstrukcji: Wisła, 5–8 marca 2013. T. 1, Wykłady. Kraków : Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa. Oddział Małopolski w Krakowie, ISBN10: 83-923401-3-2. S. 21–42. Bibliografia s. 39–42.
- CAŁA M., FLISIAK J. 2000 - Analiza stateczności skarp i zboczy w świetle obliczeń analitycznych i numerycznych. W: XXIII Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej, Wydawnictwo KGBiG AGH, Kraków, s. 27–37.
- CAŁA M., FLISIAK J. 2001 - Slope stability analysis with FLAC and limit equilibrium methods. W: *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics* (edited by Bilaux, Rachez, Detournay & Hart), A.A. Balkema Publishers, s. 111–114.
- CAŁA M., FLISIAK J. 2002 - Analiza wpływu słabej warstwy na stateczność skarp. Geotechnika i budownictwo specjalne 2002: ze szczególnym uwzględnieniem problematyki towarzyszącej eksploatacji rud miedzi red. Flisiak D.: XXV Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej, Zakopane, 18–22 marca 2002; Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH. Kraków: Wydawnictwo KGBiG AGH, s. 83–92.
- CAŁA M., FLISIAK J. 2003a - Complex geology slope stability analysis by shear strength reduction. W: *FLAC and Numerical Modelling in Geomechanics*, (edited by Brummer, Andrieux, Detournay & Hart), A.A. Balkema Publishers, s. 99–102.
- CAŁA M., FLISIAK J. 2003b - Slope stability analysis with numerical and limit equilibrium methods, [w:] *Computer Methods in Mechanics* (edited by Burczynski, Fedelinski & Majchrzak), CMM-(2003).
- CAŁA M., FLISIAK J. 2003c - Analiza stateczności skarp i zboczy z zastosowaniem zmodyfikowanej metody redukcji wytrzymałości na ścinanie. W: *Geotechnika w budownictwie i górnictwie*, pod redakcją Brząkały W., Butry J i Gałczyńskiego S., Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, s. 348–354.
- CAŁA M., FLISIAK J., TAJDUŚ A. 2004a - Numeryczne metody analizy stateczności skarp i zboczy: Warsztaty Górnicze z cyklu „Zagrożenia naturalne w górnictwie”: Problematyka zagrożeń naturalnych w górnictwie węgla brunatnego: Bełchatów, 2-4 czerwca 2004 red. nauk. Elżbieta Pilecka: Wydawnictwo IGSMiE PAN, 2004. ISSN 2081-0245 ; nr 62) S. 37–50. Bibliografia s. 49–50, Streszczenie., Abstract.
- CAŁA M., FLISIAK J., TAJDUŚ A. 2004b - Slope stability analysis with modified shear strength reduction technique: Landslides: evaluation and stabilization: proceedings of the ninth international symposium on Landslides: Vol. 2. eds. Willy A. Lacerda [et al.]. Leiden [etc.]: A. A. Balkema Publishers, s. 1085–1089. Bibliografia s. 1089, Abstract.
- CAŁA M., FLISIAK J., RYBICKI S. 2004c - Modelowanie oddziaływania odkrywkowej eksploatacji w kopalni „Bełchatów” na wysad solny Dębiny: Geotechnika i budownictwo specjalne 2004: XXVII Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej, Zakopane, 14–19 marca 2004, T. 1. red. Flisiak D.; Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki. Kraków: Wydawnictwo KGBiG AGH, 2004. S. 273–283. Bibliografia s. 283, Streszczenie, Abstract.
- CAŁA M., FLISIAK J., TAJDUŚ A. 2006a - Slope stability analysis with FLAC in 2D and 3D. *FLAC and numerical modeling in geomechanics 2006: proceedings of the 4th international FLAC symposium: 29–31 May 2006, Madrid, Spain*, eds. P. M. Varona, R. D. Hart. Minneapolis : Itasca Consulting Group, Inc., cop. 2006. S. 11–14. Bibliografia s. 14, Abstract.
- CAŁA M., CIEŚLIK J., FLISIAK J., KOWALSKI M. 2006b - Błędy w projektowaniu, a nie tylko eksploatacja górnicza przyczyną uszkodzenia autostrady: analiza warunków stateczności nasypu autostrady A4 między węzłami „Wirek” – „Batorego” Not only overexploitation, but also errors in design to blame for the highway damage // Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne: inżynieria sanitarna, geoinżynieria, tunelowanie, górnictwo, hydrotechnika, drogi, mosty; ISSN 1734-6681. 2006 nr 5, s. 26–31. Bibliografia s. 30–31.
- CAŁA M., CIEŚLIK J., FLISIAK J., KOWALSKI M. 2006c - Analiza warunków stateczności nasypu autostrady A-4 między węzłami „Wirek” – „Batorego”. Geotechnika i budownictwo specjalne pod red. Danuty Flisiak i Marka Cały; Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH. Kraków: Wydawnictwo KGBiG AGH. Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej i Geoinżynierii. S. 771–783. Bibliografia s. 782–783.

- CAŁA M., DOBROCIŃSKI S., LYDŹBA D. 2007 - Analiza numeryczna propagacji fal oraz stateczności zboczy. Wrocław : Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 90 s.. Bibliografia przy rozdz.. ISBN: 978-83-7493-306-3.
- CAŁA M., OLESIAK S. 2007 - Analiza stateczności zboczy drugiej kwatery nowego składowiska odpadów komunalnych w Zakopanem. *Górnictwo i Geoinżynieria* Tytuł poprz.: *Górnictwo* (Kraków). ISSN 1732-6702. R. 31, z. 3, s. 57–69. Bibliografia s. 68–69, Polski Kongres Górnicy. Sesja XIII, Budownictwo podziemne 2007. Kraków, Poland, 20–22.09.2007 / AGH. Kraków : AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, 2007. Opis konferencji wg obwoluty. toż. Na CD-ROM-ie. CD-ROM zawiera 14 sesji tematycznych. tekst: <https://goo.gl/1X1mvQ>.
- CAŁA M., KOWALSKI M. 2008 - Analiza stateczności skarp z gruntu zbrojonego. *Górnictwo i Geoinżynieria*. Tytuł poprz.: *Górnictwo* (Kraków). ISSN 1732-6702.. 2008 R. 32 z. 2, s. 67–77. Bibliografia s. 77, tekst: http://journals.bg.agh.edu.pl/GORNICtwo/2008-02/GG_2008_2_05.pdf.
- CAŁA M., KOWALSKI M., BETLEJ M. 2009 - Analiza przebiegu procesów osuwiskowych w oparciu o procedurę „automatic rezoning” w programie FLAC v. 6. *Górnictwo i Geoinżynieria* poprz.: *Górnictwo* (Kraków). 2009 R. 33 z. 1, s. 85–94. Bibliografia s. 94, tekst: http://journals.bg.agh.edu.pl/GORNICtwo/2009-01/GG_2009_1_06.pdf.
- CAŁA M., BETLEJ M. 2010 - Trójwymiarowa analiza stateczności zbocza w skomplikowanych warunkach geologicznych. *Górnictwo i Geoinżynieria*; ISSN 1732-6702. Tytuł poprz.: *Górnictwo* (Kraków). 2010. R. 34, z. 2, s. 141–148. Bibliografia s. 147–148, Streszczenie., Summary.. tekst: http://journals.bg.agh.edu.pl/GORNICtwo/2010-02/GG_2010_2_11.pdf.
- CAŁA M., ADAMCZYK J., KOWALSKI M. 2011a - Przestrzenna analiza stateczności składowiska odpadów komunalnych Zoniówka II .*Górnictwo i Geoinżynieria*, Kraków; ISSN 1732-6702. 2011 R. 35, z. 2, s. 129–138. Bibliografia s. 138, Streszczenie., Summary.. tekst: http://journals.bg.agh.edu.pl/GORNICtwo/2011-02/GG_2011_2_09.pdf.
- CAŁA M., KOWALSKI M. 2011b - Report on the site visit and meeting concerning open pits Hyttedalmen and Kjellmanåsen. Kirkenes, Finnmark, Norway, praca niepublikowana.
- CAŁA M., FLISIAK J., ADAMCZYK J., KOLANO M., KOWALSKI M., STOPKOWICZ A. 2012 - The analysis of the slope stability in a basalt strip mine by means of the back analysis method to determine strength parameters. *AGH Journal of Mining and Geoengineering* ; ISSN 2299-257X. 2012 vol. 36 no. 1, s. 69–79. Bibliografia s. 79 Summary., Streszczenie. tekst: <http://journals.bg.agh.edu.pl/MINING/2012.36.1/mining.2012.36.1.69.pdf>.
- CAŁA M., STOLZ M., BARANIAK P., RISTA A., RODUNERA. 2013 - Large scale field tests for slope stabilizations made with flexible facings. *Eurock 2013: rock mechanics for resources, energy and environment*: Wrocław, September 23–26, 2013 / eds. Marek Kwaśniewski, Dariusz Łydźba. London : CRC Press, Taylor & Francis Group, cop. 2013. 1 dysk optyczny. e-ISBN: 978-1-138-00080-3. S. 659–662. Bibliografia s. 662, Abstract.. Toż w wersji drukowanej. W bazie Web of Science także wersja drukowana ISBN: 978-1-4822-2907-3.
- CAŁA M., KOWALSKI M., STOPKOWICZ A. 2014a - The three-dimensional (3D) numerical stability analysis of Hyttedalmen open-pit. *Archives of Mining Sciences*; ISSN 0860-7001. 2014 vol. 59 no. 3, s. 609–620. Bibliografia s. 619–620.
- CAŁA M., FLISIAK D., FLISIAK J., KOWALSKI M., JAKÓBCZYK J. 2014b - Pole Szczerców. Analiza zmiany stanu naprężeń wysadu solnego w wyniku realizacji koncepcji eksploatacji węgla z zasobów nieprzemysłowych zalegających w rejonie wysadu solnego Dębina. Fundacja Nauka i Tradycje Górnice, praca niepublikowana.
- CAŁA M., JAKÓBCZYK J., CYRAN K. 2016 - Inclinomoter monitoring system for stability analysis of the western slope of the Belchatów field case study. *Studia Geotechnica et Mechanica*; ISSN 0137-6365. 2016 vol. 38 no. 2, s. 3–13. Bibliografia s. 12–13, Abstract.. tekst: <http://goo.gl/kLdowr>.
- CAŁA M., JAKÓBCZYK J., CYRAN K. 2017a - Application of geotechnical monitoring tools for deformation analysis in the vicinity of the Dębina salt dome (Belchatów mine, Poland). *Engineering Geology* 230, 130-141.
- CAŁA M., FELISIAK I., BLAJER M., STOPKOWICZ A., KOLANO M. 2017b - Ekspertyza geotechniczna w celu określenia warunków stateczności zbocza południowego wyrobiska złoża wapieni dewońskich Ostrówka, ETAP I i II. Fundacja Nauka i Tradycje Górnice, praca niepublikowana.
- CAŁA M., STOPKOWICZ A., KOWALSKI M., KOLANO M., BLAJER M., 2018a - Wytoczne wykonywania badań podłoża gruntowego na potrzeby budownictwa drogowego. Część 2: Wytoczne do oceny stateczności skarp i zboczy na potrzeby budownictwa drogowego. PIG, AGH, PW, 2018 r. (zrealizowane w ramach projektu naukowego „Nowoczesne metody rozpoznania podłoża gruntowego w drogownictwie”, sfinansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju oraz Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad w ramach wspólnego przedsięwzięcia Rozwój Innowacji Drogowych (RID)).
- CAŁA M., FLISIAK J., CYRAN K., KOWALSKI M., JAKÓBCZYK J. 2018b - Pole Belchatów. Analiza zmian stanu naprężeń wysadu solnego Dębina. Fundacja Nauka i Tradycje Górnice, praca niepublikowana.
- CIRIA Report 185, 1999 - The Observational Method in ground engineering: principles and applications. London.
- DĄBROWSKA Z. 1978 - Cechsztyński wysad solny Dębiny jako dowód tektoniki salinowej w południowej części niecki łódzkiej. „Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego” 309, 37-41.
- FLISIAK J., MAZUREK J., RZEPISKO R. 1972 - Warunki stateczności skarp zwałowych kopalni Józwin na podstawie terenowych badań wytrzymałości na ścinanie. XXVI Sesja Naukowa AGH, Sekcja Geomechaniki Górnicej. Kraków.
- FLISIAK J., MAZUREK J., RZEPISKO R. 1974 - Wytrzymałość na ścinanie gruntów zwałowych odkrywy Józwin w świetle badań terenowych. *Zeszyty Naukowe AGH, Górnictwo* z. 55, s. 29 – 54.
- FLISIAK J. 1981 - Charakterystyka przebiegu procesów osuwiskowych nadkładowych skarp roboczych KWB “Belchatów” w oparciu o terenowe pomiary przemieszczeń. Praca doktorska, promotor: Henryk Filcek, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Górniczy.
- FLISIAK J., MAZUREK J., ULATOWSKI W. 1989 - Zastosowanie mikrokomputerów w analizie stateczności skarp i zboczy. *Zeszyty Naukowe AGH* nr 1243, *Górnictwo*, z. 142.
- HAŁUSZCZAK A. 2004 - Cenozoic dynamics of the Dębina Salt Dome, Kleszczów Graben, inferred from structural features of the Tertiary-Quaternary cover. *Annales Societatis Geologorum Poloniae* 74, 311-318.
- HOCHMAN A., KOŁODZIEJCZYK K., KULAA., MUSIELAK W. OŻÓG J. 2000 - Kopalnia Węgla Brunatnego Belchatów. 25 lat. Od przedsiębiorstwa państwowego do spółki akcyjnej. Wydawnictwo Tekst, 304, Bydgoszcz.
- HYDZIK-WIŚNIEWSKA J., WILK A., BEDNAREK Ł., OLESIAK S. 2018 - Mixture of crushed-stone aggregate as material for substructure layers. *Studia Geotechnica et Mechanica*; ISSN 0137-6365. 2018 vol. 40 no. 2, s. 154–162. Bibliografia s. 161–162: http://www.sgm.pwr.edu.pl/iss/2018/no2/art09_no2_2018.pdf
- HYDZIK-WIŚNIEWSKA J., PEKALA A. 2019 - The evaluation of the physico-mechanical properties of selected Carpathian sandstones in terms of their use as a armourstone. *Archives of Mining Sciences*; ISSN 0860-7001. 2019 vol. 64 no. 1, s. 65–77. Bibliografia s. 76–77.: <http://journals.pan.pl/Content/110185/PDF/Archiwum-64-1-05-Hydzyk.pdf?handler=pdf>
- JAKÓBCZYK J., CAŁA M., STOPKOWICZ A. 2015 - What were the reasons for the rapid landslide occurrence in “Piaseczno” open pit?: analysis of the landslide process. *Studia Geotechnica et Mechanica* ; ISSN 0137-6365. 2015 vol. 37 no. 1, s. 25–35. Bibliografia s. 35, Abstract.
- KOLANO M., MAZUREK J. 2013 - The results of the research on physical and mechanical properties of rock analogues and moon soils (Wyniki badań właściwości fizycznych i mechanicznych analogów skal i gruntów księżycowych). *AGH Journal of Mining and Geoengineering* ; ISSN 2299-257X. Tytuł poprz.: *Górnictwo i Geoinżynieria*; ISSN: 1732-6702. - 2013 vol. 37 no. 1, s. 35–49. - Bibliografia s. 49. 2013.
- KORMAN S., FLISIAK J., MAZUREK J. 1978 - Analiza przebiegu osuwiska skarpy stałej w jednej z kopalni odkrywkowych. „*Górnictwo*”, z. 3, s. 173 – 184.

- KOWALSKI M. 2014 - Metodyka oceny warunków stateczności skarp o złożonej geometrii i budowie geologicznej, Rozprawa doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie. Wydział Górnictwa i Geoinżynierii. Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki. Kraków.
- MAŁKOWSKI P. 2015 - Behaviour of joints in sandstones during the shear test. *Acta Geodynamica et Geomaterialia* ; ISSN 1214-9705. 2015 vol. 12 no. 4, s. 399-410. Bibliografia s. 409-410, Abstract. Publikacja dostępna online od: 2015-08-10.
- MAZUREK J. 1981 - Analiza parametrów osuwisk nadkładowych skarp wykopów niektórych kopalń odkrywkowych, Praca doktorska, promotor: Henryk Filcek, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie.
- MAZUREK J. 1982 - Analiza możliwości wykorzystania metody kinematycznej do prognozowania niektórych parametrów geometrycznych osuwisk. Materiały Sesji Naukowej nt.: Badania geologiczno-inżynierskie w górnictwie. S. 297 – 310. AGH, Kraków 21-21 września 1982.
- MAZUREK J. 1984 - Wpływ wartości niektórych parametrów geometrycznych osuwisk na bezpieczeństwo pracy koparek kołowych. *Górnictwo*, z. 2, s. 153 – 168.
- MAZUREK J. 1986 - Wytrzymałość gruntów skarp osuwiskowych – obliczenia odwrotne. „*Górnictwo*”, z. 1, s. 11 –30.
- MAZUREK J. 1987a - Wykorzystanie metod analizy odwrotnej do celów górnictwa odkrywkowego. VIII Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania. Wrocław, październik 1987.
- MAZUREK J. 1987b - Wpływ eksploatacji otworowej kopalni Machów II na stateczność zbocza odkrywki Machów. Materiały Seminarium NOT nt.: Zagadnienia kopalni Osiek w świetle aktualnych problemów górnictwa otworowego siarki. Chańcza, 24 – 25 września 1987.
- MAZUREK J., THIEL K. 1991 - Stateczność skarp w rejonie wlotów i wylotów sztolni. Materiały Seminarium w Świnnej Porębie (11 września 1991 r.) Polskiego Komitetu Międzynarodowej Komisji Wielkich Zapór, Podkomitetu Mechaniki Skal i Podłoża nt.: Projektowanie i budowa sztolni hydrotechnicznych przy zaporze w Świnnej Porębie (na rzece Skawie). Warszawa.
- MAZUREK J., ZABUSKI L., BESTYŃSKI Z. 1988 - Metody i wyniki stabilizowania skarpy w rejonie wlotów do sztolni hydrotechnicznych. Polski Komitet Wielkich Zapór, Podkomitet Mechaniki Skal i Podłoża. Materiały Seminarium nt. Stabilizacja masywów skalnych w podłożu budowli hydrotechnicznych. Świnna Poręba, 23 września 1998 r.
- MAZUREK J., CAŁA M. 2011 - Warunki rozprzestrzeniania się osuwiska zagrożającego budynkowi mieszkalnemu *Górnictwo i Geoinżynieria*. Tytuł poprz.: *Górnictwo* (Kraków). 2011 R. 35 z. 2, s. 433–440. Bibliografia s. 440, Streszczenie, Summary. tekst: http://journals.bg.agh.edu.pl/GORNICTWO/2011-02/GG_2011_2_44.pdf.
- OLESIAK S. 2015 - Ocena wybranych właściwości wytrzymałościowych ilów miocenijskich na podstawie badań sondą wkręcaną WST. „*Inżynieria Morska i Geotechnika*” ; ISSN 0867-4299. - 2015 R. 36 nr 1, s. 22–27. - Bibliografia s. 27.
- OLESIAK S. 2017 - Evaluation of undrained shear strength of Miocene clay from the Weight Sounding Test (WST) -*Archives of Mining Sciences*, ISSN 0860-7001. 2017 vol. 62 no. 2, s. 367–384. Bibliografia s. 384. - tekst: <http://archiwum.img-pan.krakow.pl/index.php/AMS/article/download/1016/760>.
- PN-EN 1997-1 EUROKOD 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne. PKN. Warszawa, maj 2008.
- RZEPISKOR R. 1970 - Kinematyka pełzania roboczych skarp zwałów kopalń odkrywkowych w świetle badań w kopalni Turów. Praca doktorska, promotor: Stanisław Korman, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie. Wydział Górnictwa.
- RYBICKI S., MAZUREK J., FLISIAK J. 1997 - Geotechniczne problemy likwidacji odkrywkowej kopalni siarki w Machowie. *Prace Nauk. Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej* nr 72. Konferencje 39. Geotechnika w zastosowaniach inżynierskich. Wrocław 23 - 24 maja 1997 r.
- SEWERYN K., KOLANO M., MAZUREK J. 2014 - Determining the geotechnical properties of planetary regolith using Low Velocity Penetrometers. *Planetary and Space Science* ; ISSN 0032-0633. - 2014 vol. 99, s. 70–83. - Bibliografia s. 82–83, Abstract. - Publikacja dostępna online od: 2014-05-22. - tekst: <http://goo.gl/5DS4ls>
- STOPKOWICZ A., CAŁA M. 2004 - Analiza stateczności zboczy zlokalizowanych we fliszu karpackim z zastosowaniem metod numerycznych. *Geotechnika i budownictwo specjalne 2004: XXVII Zimowa Szkoła Mechaniki Górników: Zakopane, 14–19 marca 2004, T. 1 / red. Danuta Flisiak, Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH. Kraków: Wydawnictwo KGBiG AGH, 2004. S. 519–529. Bibliografia s. 528–529.*
- STOPKOWICZ A., CAŁA M. 2006 - Wybrane zagadnienia analizy stateczności nasypów: *Geotechnika i budownictwo specjalne pod red. Danuty Flisiak i Marka Cały; Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH. Kraków: Wydawnictwo KGBiG AGH, 2006. (ZSMGiG [Zimowa Szkoła Mechaniki Górników i Geoinżynierii] ; nr 29). S. 441–450. Bibliografia s. 450, Abstract.*
- STOPKOWICZ A., CAŁA M. 2007 - Metody do weryfikacji: wybrane zagadnienia analizy stateczności nasypów kolejowych. *Nowoczesne Budownictwo Inżynierskie: inżynieria sanitarna, geoinżynieria, tunelowanie, górnictwo, hydrotechnika, drogi, mosty; ISSN 1734-6681. 2007 nr 3, s. 62–65. Bibliografia s. 65.*
- STOPKOWICZ A. 2019 - Ocena warunków stateczności nasypów kolejowych, rozprawa doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie. Wydział Górnictwa i Geoinżynierii. Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki. Kraków.
- TERZAGHI K., PECK R. 1967 - *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 2nd Edition, John Wiley, New York.
- WIDERA M. 2016 - Characteristics and origin of deformation structures within lignite seams – a case study from Polish opencast mines. *Geological Quarterly* 60, 179–189.

Artykuł wpłynął do redakcji – wrzesień 2019
Artykuł akceptowano do druku – 25.09.2019



FTT WOLBROM®

Twój wypróbowany partner!

**Innowacyjna
droga
rozwoju**

www.fttwolbrom.com.pl