



Prognozowanie deformacji powierzchni w górnictwie węgla kamiennego w Polsce i na świecie, metody empiryczne, czy numeryczne?

Predicting surface deformations in coal mining industry in Poland and in the world, empirical or numerical methods?

Dr hab. inż. Andrzej Kowalski*, prof. GIG

*Wiedza to wartość.
Wykorzystanie wiedzy to potęga.
NN*

Treść: W referacie przedstawiono dokonania polskich uczonych w zakresie prognozowania deformacji powierzchni głównie pod wpływem podziemnej eksploatacji węgla kamiennego, zarówno na etapie ich powstawania, jak i w aktualnych uwarunkowaniach geologicznych i górniczych (2017 r.). W drugiej części omówione zostały doświadczenia z prognozowania deformacji powierzchni w górnictwie węgla kamiennego na świecie. Następnie przedstawiono rozwój wiedzy w zakresie prognozowania deformacji z zastosowaniem metod numerycznych, opartych na dyskretyzacji górotworu i symulacji skutków pod wpływem eksploatacji górniczej. Pomimo dobrych wyników testowania modeli numerycznych w pracach doktorskich i projektach badawczych, stosowanie metod numerycznych w Polsce nie jest jeszcze konkurencją dla teorii Knothe - Budryka. W odpowiedzi na pytanie postawione w tytule uważa się, że w Polsce prognozy deformacji będą oparte na teorii Knothe - Budryka, albo rozwiązaniach na niej opartych, natomiast na świecie przeważać mogą metody numeryczne, ale czy wyeliminują metody empiryczne?

Abstract: This paper presents the achievements of Polish scientists in the field of the surface deformations prediction mainly under the influence of underground hard coal mining, both at their formation stage and in current geological and mining conditions (2017). The second part discusses the experience in predicting surface deformations in hard coal mining industry worldwide. The development of knowledge in the field of predicting deformations by use of numerical methods based on rock mass discretisation and the simulation of effects under the influence of mining exploitation was presented. Despite the good results of numerical modeling in doctoral dissertations and research projects, the use of numerical methods in Poland is not yet a competition for the Knothe - Budryk theory. In response to the question posed in the title, it is considered that in Poland the predictions of deformations will be based on the Knothe - Budryk theory or solutions based on the theory, while in the world numerical methods may prevail, but will they eliminate empirical methods?

Słowa kluczowe:

eksploatacja podziemna, deformacje powierzchni, prognozy, metody

Keywords:

underground mining, surface deformations, predictions, methods

1. Wprowadzenie

Kolejne XIV Dni Miernictwa Górniczego i Ochrony Obiektów Budowlanych, które odbyły się 27-29 września 2017 r., skłaniają do refleksji na temat podejmowania badań naukowych w zakresie opisu i prognozowania deformacji powierzchni w Polsce i na świecie.

W Polsce minęły już trzy pokolenia od powstania polskiej szkoły prognozowania deformacji, w tym czasie zmieniło się także polskie górnictwo. W 2015 r. zmarł prof. Stanisław Knothe, ostatni z grupy Twórców i wielkich polskich uczonych (Budryk, Sałustowicz, Litwiniszyn, Kochmański i Kowalczyk). Byli to generalnie Twórcy metod empirycznych,

tzw. geometryczno-całkowych, ogólnej – teoria Litwiniszyna, jak i jej szczególnego rozwiązania – Knothe - Budryka.

Obecnie w Polsce (2016 r.) średnia głębokość eksploatacji wynosi 770 m, przy czym eksploatuje się już na głębokości 1300 m. Jest to eksploatacja złoża wielopokładowego. Dominuje system ścianowy z zawałem stropu o dużych dobowych postępach. Z uwagi na zagospodarowanie powierzchni i potrzebę jej ochrony występują już ograniczenia w prowadzeniu eksploatacji podziemnej. Działalność górnicza nie jest społecznie akceptowana, szczególnie przy podejmowaniu decyzji o eksploatacji nowych złóż.

Na świecie zmieniła się geografia górnictwa węgla kamiennego, kraje o bogatej tradycji i nauce górniczej, jak Anglia, skończyły eksploatację węgla kamiennego, a Niemcy skończą w 2018 r. Natomiast rozwój górnictwa węgla kamiennego ma miejsce w USA, RPA, Chinach, Rosji, Australii, Indonezji

*) Główny Instytut Górnictwa, Katowice

i Indiach. Złóża węgla kamiennego w Ameryce, Azji Australii występują płytko i są eksploatowane na najczęściej małych i średnich głębokościach. Są to zazwyczaj złoża jednopokładowe. W znacznym zakresie są eksploatowane pod terenami niezagospodarowanymi. Obserwuje się podejmowanie złóż innych surowców: miedzi, potasu, ropy i ewaporatów, a także rozwija się górnictwo podwodne, prowadzi się próby podziemnego zgazowania węgla kamiennego.

Z końcem XX wieku nastąpił rozwój metod numerycznych, które dzięki komputerowej technologii obliczeń znajdują powszechne zastosowanie w wielu dziedzinach nauki, w tym i do prognozowania deformacji górotworu. Zalicza się je do metod deterministycznych, które stwarzają większe możliwości badawcze niż metody empiryczne.

Celem artykułu jest próba podsumowania stanu wiedzy w Polsce i na świecie w zakresie prognozowania górniczych deformacji i odpowiedź na pytanie co dalej, jakie będą stosowane metody, empiryczne czy numeryczne?

2. Polskie doświadczenia

Z chwilą powstania polskich teorii ruchów górotworu, w 1953 r. teorii Knothego – Budryka (Knothe 1953), a w teorii Kochmańskiego (1956) do końca lat sześćdziesiątych ubiegłego stulecia teorie te były traktowane równorzędnie. Do obliczeń deformacji stosowano tabele funkcji wskaźników deformacji dla zestandaryzowanych wymiarów pól eksploatacyjnych bądź grafikony. Rozwój technologii obliczeniowych i stosowanie w tym celu komputerów, najpierw „Odry 1204”, potem Odry „1305”, następnie minikomputerów, spowodował „rewolucję” w obliczeniach deformacji górotworu i powierzchni. Z „rewolucji” tej zwycięsko wyszła teoria Knothego - Budryka, prostsza do oprogramowania. Ponadto według teorii Knothego - Budryka tworzono przepisy dotyczące klasyfikacji terenów górniczych, która jest nadal podstawą do sporządzania map z deformacjami do planów ruchu kopalń, a także podstawą do sporządzania opinii górniczo-geologicznych do zabudowy terenów górniczych.

Teoria Knothego – Budryka powstała z doświadczeń – obserwacji obniżen na powierzchni dla dużych pól eksploatacyjnych (funkcje dotyczące obniżen), a dla przemieszczeń poziomych na bazie założenia Awierszyna. Doświadczenia z początku lat sześćdziesiątych bazowały na małej i średniej głębokości eksploatacji i na eksploatacji z podsadzką hydrauliczną. Obecnie w latach 2015–2017 warunki geologiczne i górnicze różnią się istotnie, tabela 1.

Tabela 1. Porównawcze zestawienie uwarunkowań geologicznych i górniczych w polskich kopalniach węgla kamiennego

Table 1. Comparative statement of geological and mining conditions in Polish hard coal mines

Dane	1990	2016	Uwagi
Liczba kopalń	70	22*	*W tym dwa małe, prywatne zakłady górnicze ** w 2015r. *** w 2017r.
Wydobycie, mln Mg	147,4	70,5	
Długość frontu ściany, m	150,6	220–250	
Średnie wydobycie ze ściany, tys. Mg	863	~2930	
Liczba ścian	766	96**	
Liczba ścian w kopalni	10,9	3,8	
Średnia głębokość, m	515	770	
Wysokość ściany, m	2,3	2,0–3,5	
Średni postęp, m/dobę	1,9	~4,0	
Udział wydobywania z podsadzką, %	16,7	~0***	

To, że teoria Teoria Knothego – Budryka nie jest idealna wiadomym było już prawie od samego początku, najważniejsze zastrzeżenia dotyczyły tzw. obrzeża eksploatacyjnego i symetrii niecki obniżeniowej, co szeroko wyjaśniał prof. S. Knothe (Knothe 1984, 1993). W nawiązaniu do tych zastrzeżeń były podejmowane próby delinearizacji funkcji wpływów – rozwiązania B. Dzegniuka, K. Grenia, J. Zycha, Białka i Mielimaki (Kowalski 2015). Niektóre z nich znalazły praktyczne zastosowanie, ale tylko do wysublimowanych obliczeń *a posteriori*.

Udokumentowana na mapach działalność górnictwa w GZW prowadzona jest od ponad 250 lat. Zmienia się technologia eksploatacji górniczej, maleje udział eksploatacji z podsadzką hydrauliczną (w 2017 r. tylko w dwóch małych zakładach górniczych do podsadzania chodników eksploatacyjnych), dominuje eksploatacja prowadzona systemem ścianowym z zawałem stropu, której dobowe postępy dochodzą do kilkunastu metrów. Kolejną cechą górnictwa w GZW jest koncentracja eksploatacji kopalni – w okresie jednego roku prowadzenie eksploatacji w 3–4 ścianach – parcelach. Eksploatacje powodują powstawanie na powierzchni niecek niepełnych, a w rejonach koncentracji krawędzi w przybliżeniu w jednej płaszczyźnie pionowej, występują strefy Liniowych Nieciągłych Deformacji Powierzchni (LNDP), najczęściej widoczne na drogach i placach w formie szczelin i stopni oraz ze struktur z nich złożonych (Kowalski 2015).

Drugim elementem specyfiki deformacji powierzchni jest prędkość narastania deformacji, a także fluktuacje ich narastania, wynikające z nieregularnej prędkości frontu ściany, a zwłaszcza z uwagi na przerwy w dni wolne od pracy.

Zdaniem autora, próby modyfikacji funkcji wpływów i metod empirycznych muszą uwzględniać fakt, że dane wejściowe do prognozy są zawsze obarczone pewnymi niedokładnościami (błędami), w związku z czym prognoza deformacji musi być obciążona prawdopodobieństwem jej trafności, co można ocenić *a posteriori* w nawiązaniu do wyników pomiarów deformacji. Natomiast *a priori* prognozę wykonujemy z pewnym błędem, który można oszacować (dokładność prognoz), co jest istotą prognoz deformacji!

3. Doświadczenia z górnictwa węgla kamiennego na świecie

W Wielkiej Brytanii do prognoz deformacji stosowano formuły empiryczne opracowane na podstawie uśrednionych wyników pomiarów wskaźników deformacji z 165 linii pomiarowych (Subsidence ... 1975, Whittaker, Reddish 1989). Przykładowo zestandaryzowano zależność między współczynnikiem eksploatacyjnym a ilorazem wymiaru długości ściany (przez głębokość eksploatacji). Również rozkład odkształceń poziomych i nachyleń dla zestandaryzowanych parametrów eksploatacji. Jeśli zastosuje się metodę Knothego, ale uwzględniając opis niecki dwoma parametrami $tg\beta$, czyli dwoma promieniami rozproszenia wpływów (metoda Białka), wówczas można opisać nieckę, która będzie analogiczna do opisu wynikającego z badań angielskich. Dotyczy to również odkształceń poziomych (Białek, 1996, 2003).

Od kilkudziesięciu lat w niemieckich kopalniach do prognozowania deformacji powierzchni stosowano i stosuje się metodę Erharda-Sauera, znaną również, jako metodę Ruhrkohle, która jest zbieżna z teorią Knothego - Budryka. Teoria Knothego – Budryka została opublikowana w 1953 r, a metoda Ruhrkohle w 1961r. W metodzie Ruhrkohle obniżenie powierzchni osiąga maksymalną wartość, jeśli zostanie wyeksploatowany pokład węgla kamiennego o promieniu R,

któremu odpowiada kąt graniczny γ (Kratzsch 2008). Wartość promienia zasięgu wpływów, dla sparametryzowanej funkcji wpływów, odpowiada rozkładowi normalnemu Gaussa o prawdopodobieństwie $\alpha=0,999$. W Niemczech do prognoz stosowano dwa parametry $\alpha=0,9$ i $\text{tg}\beta=1,6$.

Z uwagi na dużą powierzchnię obszaru Chin, jak i zróżnicowane warunki geologiczne i górnicze, doświadczenia z kształtowania się i prognozowania deformacji powierzchni pod wpływem podziemnej eksploatacji górniczej są obszerne i zróżnicowane. W dużym stopniu do prognozowania deformacji wykorzystywana jest teoria Knothe'go - Budryka, jak i rozwiązania wynikające z teorii Litwiniszyna (Liu, Kouhna 1990), a także doświadczenia niemieckie. W 1984 r. w języku chińskim wydano Bergschadenkunde autorstwa H. Kratzscha.

W niektórych rejonach kraju, na przykład w części zachodniej w prowincji Shaanxi, z uwagi na płytkie zaleganie grubych pokładów węgla kamiennego powstają duże deformacje, które nie znajdują akceptacji społecznej, dlatego podejmowane są eksploatacje, pod wpływem których na powierzchni deformacje są ograniczane do minimum (Zhang i in. 2016).

W coraz to większym stopniu do opisu deformacji stosuje się metody numeryczne, jak i sposoby prognozowania, w których łączy się opis deformacji metodami empirycznymi i analitycznymi, stosując opis geomechaniczny deformowanego górotworu (Cui i in. 2000, Hu, Lian 2015).

W Stanach Zjednoczonych, w górnictwie podziemnym dominują dwa systemy eksploatacji – komorowo-filarowy i ścianowy, w których technologia eksploatacji pozwala uzyskiwać wysokie wydajności. Systemem komorowo-filarowym uzyskuje się około 50% produkcji węgla kamiennego z kopalń podziemnych. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że w przeciwieństwie do górnictwa polskiego, prowadzona jest tu eksploatacja jednopokładowa, która sprzyja stosowaniu tego typu systemu.

Prognozowanie deformacji nad eksploatacjami pokładów węgla kamiennego prowadzonymi frontami ścianowymi w dużym stopniu bazuje na doświadczeniach angielskich oraz wykorzystuje się doświadczenia zarówno niemieckie, jak i polskie (Jarosz i in. 1990).

Inną metodą empiryczną do prognozowania deformacji powierzchni na skutek eksploatacji górniczej jest model M.D. Salomona (Salomon 1989). Model ten opracowano dla eksploatacji ścianowej złoża jednopokładowego na małej głębokości, w którym budowa górotworu jest warstwowa. Polega on na wykorzystaniu konwergencji wyrobiska eksploatacyjnego i transformacji go na powierzchnię za pomocą jednej z wybranych funkcji wpływów.

Obecnie (luty 2015) do prognozowania deformacji powierzchni spowodowanych podziemną eksploatacją stosuje się program komputerowy *Surface Deformation Prediction Software System* -SDPS (Agioutantis 2015). System ten wykorzystuje funkcje wpływów, jak i opiera się na kilku empirycznych zależnościach uzyskanych na drodze analizy statystycznej danych o eksploatacji i wynikach pomiarów deformacji, opracowanych przez Zespół pod kierunkiem Karmisa.

Rozwój górnictwa podziemnego w Australii, Indiach, krajach Oceanii, zwłaszcza w Indonezji, gdzie wcześniej nie było doświadczeń z kształtowania się deformacji powierzchni, lub ich nie gromadzono, powoduje, że są prowadzone liczne badania deformacji. Tworzy się fizyczne modele górotworu z piasku i gipsu na zasadzie podobieństwa do budowy górotworu (modele ekwiwalentne), w których symuluje się deformacje górotworu i powierzchni (Ghabraie i in. 2015, 2017a, 2017b). Rozkład deformacji na powierzchni mierzy się za pomocą kombinacji przetworników optycznych, fotogrametrii i skanowania laserowego. Deformacje górotworu opisywa-

no na podstawie opracowanego algorytmu, wykorzystując przemieszczenia odpowiedniej liczby punktów, w trakcie i po zakończeniu eksploatacji.

Niezależnie od modelu fizycznego modelowano deformacje metodami numerycznymi, w szczególności MES, który był rekomendowany z uwagi na możliwość odwzorowania geometrii i nieliniowego zachowania się górotworu, choć MES jest z natury metodą opisującą górotwór w sposób ciągły i ma ograniczone możliwości opisu nieciągłości geologicznych.

Z badań deformacji powierzchni prowadzonych w górnictwie węgla kamiennego w Australii wynika, że:

- Tam gdzie nie zgromadzono dostatecznej liczby wyników geodezyjnych pomiarów deformacji powierzchni, przez co podejmowane są próby fizycznego modelowania górotworu i symulacji jego deformacji.
- Równolegle prowadzi się modelowanie numeryczne, które jest weryfikowane na modelach fizycznych - ekwiwalentnych. Metody numeryczne są dobrym narzędziem, mają jednak ograniczenia z uwagi na zróżnicowanie parametrów wytrzymałościowych skał w przestrzeni kopalni.
- Fizyczne i numeryczne modelowanie deformacji górotworu uważa się za bardziej praktyczne niż metody empiryczne, które są bardziej przynależne do miejsca (lokalne). Z tego powodu metody analityczne są lepsze od metod empirycznych.
- Ważne jest prowadzenie monitoringu deformacji, aby weryfikować opisy deformacji przez połączenie wyników modeli fizycznych oraz numerycznych, które są podstawą do zrozumienia procesów deformacji powierzchni.

W Rosji i na Ukrainie prognozy deformacji powierzchni pod wpływem eksploatacji podziemnej są sporządzane na podstawie wzorów empirycznych (Jofis, Szmielw 1985). Dla znormalizowanych współrzędnych, wzdłuż linii prostopadłej do krawędzi eksploatacji, wyznaczono współczynniki funkcji wskaźników deformacji: obniżen, nachyleń, krzywizn, jak i przemieszczeń oraz odkształceń poziomych. Współczynniki funkcji zostały opracowane dla dwóch zagłębi Kuzbasu i Donbasu. Natomiast do obliczania deformacji w funkcji czasu znormalizowane funkcje obniżen i przemieszczeń poziomych oraz ich pochodnych wyznaczono jeszcze dla zagłębi lwowsko-wołyńskiego, zachodniego Donbasu i Karagandy. Z obrad prowadzonych w Szkole Eksploatacji Podziemnej wynika, że współcześnie podejmowane są próby numerycznego modelowania górotworu i symulacji deformacji powierzchni.

4. Numeryczne modelowanie deformacji powierzchni w Polsce

W Polsce prekursorami zastosowania metod numerycznych do modelowania deformacji górotworu byli: H. Filcek, A. Tajduś i J. Walaszczyk. W zbiorczej publikacji (Filcek i in. 1994) przedstawiono zastosowanie metod numerycznych, szczególnie metody elementów skończonych (MES) w zagadnieniach mechaniki górotworu. Uzasadniają one stosowanie uproszczonego modelu anizotropowego górotworu, tzw. modelu transwersalnie izotropowego, który zakłada, że w płaszczyźnie poziomej zależność między naprężeniami i odkształceniami jest izotropowa, a własności sprężyste są jednakowe. W płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny izotropii własności przyjmują inne wartości. Pełniejszy opis zastosowania metod numerycznych w geotechnice przedstawiono w publikacji (Tajduś i in. 2012).

Jako pierwsza, metody numeryczne do opisu deformacji powierzchni, zastosowała A. Chrzanowska-Szostak

w pracy doktorskiej (Chrzanowska-Szostak 1988), tabela 2. Przedstawiła, stosując MES, przykłady porównania wyników obliczeń obniżeń (w skrócie metodą S-C) z wynikami pomiarów. W metodzie S-C, górotwór jest traktowany jako materiał nieliniowo sprężysty, o zerowej wytrzymałości skał na rozciąganie. W nawiązaniu do modelu S-C powstały prace, zarówno pod kierunkiem A. Chrzanowskiej-Szostak, jak i A. Chrzanowskiego, w których opisywano stan górotworu będący pod wpływem eksploatacji w polskich kopalniach węgla kamiennego (Chrzanowska-Szostak i in. 1997 Chrzanowski, Szostak-Chrzanowski 2004, Szostak-Chrzanowski i in. 2011). W ostatnich latach, bazując na metodzie S-C, realizowane były prace doktorskie na Politechnice Wrocławskiej (Milczarek 2011, Warchala 2015).

Kolejnym, znaczącym krokiem numerycznego modelowania górotworu były prace M. Kwaśniewskiego (Kwaśniewski, Wang 1994), którzy traktowali górotwór, jako ośrodek nieliniowy, sprężysto-krucho-plastyczny o wytrzymałości opisanej warunkiem stanu granicznego Hoeka-Browna. Do obliczeń stosowano program różnic skończonych FLAC v.3.22 (tabela 2). M. Kwaśniewski zwrócił uwagę na potrzebę uwzględnienia w analizie numerycznej spękań górotworu, w którym jest prowadzona eksploatacja z zawałem stropu, gdyż założenie o ciągłości ośrodka skalnego do prognozowania deformacji górotworu jest dużym uproszczeniem.

Numerycznym modelowaniem ruchów górotworu pod wpływem eksploatacji podziemnej od 2001r. zajmuje się M. Wesołowski (Wesołowski 2001). Wynikiem Jego testowań jest wykazanie, że w przypadku modelu liniowo sprężystego o transwersalnie izotropowej budowie warstw możliwe jest uzyskanie z obliczeń numerycznych w miarę dokładnego przybliżenia rzeczywistych deformacji powierzchni terenu górniczego (Białek, Wesołowski 2011, Wesołowski 2013, 204, 2016).

Zaznaczyć należy także wkład K. Tajdusia do modelowania górotworu, przy zastosowaniu modelu sprężystego,

transwersalnie izotropowego i warstwowej budowy górotworu (Tajduś 2007, 2009, 2013).

Z uwagi na brak doświadczeń (wyników pomiarów deformacji powierzchni) do pierwszej prognozy dla celów utylitarnych zastosowano rozwiązanie hybrydowe (Kowalski, Walentek 2013). Istota rozwiązania hybrydowego polega na wyznaczeniu współczynnika eksploatacyjnego (który jest stosowany do obliczeń według teorii Knothego - Budryka), w oparciu o wyznaczone numerycznie obniżenie stropu bezpośredniego nad polem eksploatacyjnym (utworzonym z chodników eksploatacyjnych i plotów (filarów) węglowych).

W drugim kroku, znając wartość współczynnika eksploatacyjnego oraz przyjmując parametr górotworu ($tg\beta$), prognozuje się deformacje powierzchni wzorami teorii Knothego - Budryka.

5. Zakończenie

Następuje rozwój wiedzy o prognozowaniu deformacji, podejmuje się próby prognoz z zastosowaniem metod numerycznych, opartych na dyskretyzacji górotworu i symulacji skutków pod wpływem eksploatacji górniczej.

Tworzenie modeli numerycznych górotworu w rejonie wyrobisk górniczych (tzw. skala lokalna) jest już stosowane w polskim górnictwie węgla kamiennego, w celach utylitarnych do rozwiązań inżynierskich (wyznaczanie szerokości plotów i filarów węglowych), natomiast nie jest stosowane w skali globalnej, do prognozowania deformacji powierzchni. Pomimo dobrych wyników testowania modeli numerycznych w pracach doktorskich i projektach badawczych, stosowanie metod numerycznych w Polsce nie jest konkurencją dla teorii Knothego - Budryka.

Jak wykazuje praktyka w GZW teoria Knothego - Budryka jest niezastąpiona. Wynika to z doświadczeń płynących z jej wieloletniego stosowania, zgromadzonych wartości

Tabela 2. Wykaz danych dotyczących prognozowania deformacji powierzchni przy zastosowaniu metod numerycznych
Table 2. List of data concerning the predictions of the surface deformations by use of numerical methods

Lp.	Autorzy (Rok)	Jednostka naukowa	Model górotworu, ośrodek	Program (Metoda)	Cel badań	Miejsce testowania	Ocena wyników
1.	Chrzanowska - Szostak A. (1988)	University of Brunswick, AGH	Nieliniowo-sprężysty (bez rozciągania)	Autorski FEMMA (MES)	Praca doktorska	Kopalnie węgla kamiennego, miedzi, cynku i ołowiu oraz soli	Możliwość prognozowania deformacji dla złożonych warunków geologicznych i górniczych
2.	Kwaśniewski M., Wang J. (1994)	Politechnika Śląska	Nieliniowy, Sprężysto-krucho-plastyczny	FLAC 3.22 (MRS)	Testowanie modelu	KWK Staszic pokład 352, ściana 1003	Bardzo dobra zgodność z wynikami pomiarów wskaźników deformacji powierzchni
3.	Wesołowski M. (2001)	Politechnika Śląska	Sprężysto-liniowo-izotropowy	COSMOSM (MES)	Praca doktorska	Porównanie z obliczeniami według teorii Knothego - Budryka	Niecki są bardziej rozległe niż obliczone według teorii Knothego - Budryka
4.	Tajduś K. (2007, 2009, 2015)	IMG PAN	Transwersalnie izotropowy; parametry wg. klasyfikacji GSI	COSMOSM ABACUS, (MES)	Praca doktorska, testowanie modelu	Modelowanie deformacji dla KWK Piast, pokład 207, ściany 329 i 328	Porównanie przebiegu niecki pomierzonej i numerycznie
5.	Białek J. Wesołowski M (2011) Wesołowski M. (2013, 2014, 2016)	Politechnika Śląska	Liniowo-sprężysty, transwersalnie izotropowy	FLAC 3D (MRS)	Poznawczy	Opis deformacji dla niecki w kopalniach Chwałowice, Budryk i Pokój	Porównanie przebiegu niecki pomierzonej i numerycznie

parametrów, a także rozpoznania odchyłek, z jakimi wykonuje się prognozę w stosunku do później zmierzonych deformacji powierzchni. Nie bez znaczenia jest możliwość opracowywania prognoz z zastosowaniem programów komputerowych, które pozwalają symulować proces deformacji dla projektów eksploatacji górniczej. Dalsze poszukiwania w prognozowaniu deformacji powinny podążać najogólniej w dwóch kierunkach – empirycznym i numerycznym:

– Doskonalenie istniejących, albo tworzenie nowych modeli do prognozowania deformacji, w celu uzyskania wyników zgodnych z pomiarami, które najczęściej sprawdza się na drodze analizy wstecznej oraz podejście do prognoz w ujęciu probabilistycznym.

– Rozwoju metod numerycznych, wykorzystujących geomechaniczny opis górotworu w ujęciu globalnym. Zastosowanie w tym celu metod numerycznych i dyskretyzacji ośrodka, rodzi wielkie nadzieje na trafniejsze niż dotychczas prognozowanie wpływów eksploatacji. Metody te do opisu deformacji powierzchni stosowane są już w górnictwie na świecie, w Polsce są testowane.

Konkluzja, w Polsce prognozy deformacji powierzchni nadal będą oparte na teorii Knothe'go - Budryka, albo rozwiązaniach hybrydowych, natomiast na świecie przeważać będą w coraz większym zakresie metody numeryczne, ale czy wyeliminują metody empiryczne, tego obecnie nie wiadomo.

Literatura

- AGIOUTANTIS Z. 2015 - Subsidence Prediction Using SDPS. University of Kentucky. Lexington (archiwum GIG-BB).
- BIAŁEK J. 1996 - Angielska metoda prognozowania deformacji. Materiały konferencyjne, Ochrona Środowiska na Terenach Górniczych. Zarząd Główny SITG, Komisja Miernictwa Górniczego i Ochrony Środowiska, Krynica.
- BIAŁEK J. 2003 - Algorytmy i programy komputerowe do prognozowania deformacji terenu górniczego. Wydawnictwa Politechniki Śląskiej, Seria Monografie. Gliwice.
- BIAŁEK J., WESOŁOWSKI M. 2011 - Problematyka numerycznego modelowania ruchów terenu górniczego na przykładzie eksploatacji pokładu 354 KWK „Chwałowice”. Prace Naukowe GIG. XI Dni Miernictwa Górniczego i Ochrony Terenów Górniczych. Kwartalnik „Górnictwo i Środowisko” s. 38-49.
- CHRZANOWSKA-SZOSTAK A. 1988 - Wpływ podziemnej eksploatacji złóż o skomplikowanej geometrii na powierzchnię terenu w świetle badań metodą elementów skończonych. Akademia Górniczo-Hutnicza Wydział Górniczy. Kraków, (praca doktorska)
- CHRZANOWSKA-SZOSTAK A., PIEŁOK J., PIWOWARSKI W., PIETRUSZKA K. 1997 - Wstępna analiza pola górniczych deformacji górotworu w dyskretnym modelu metody elementów skończonych i ciągłym modelu teorii geometrycznej. IV Dni Miernictwa Górniczego i Ochrony Terenów Górniczych, Rytro.
- CHRZANOWSKI A., SZOSTAK-CHRZANOWSKI A. 2004 - Physical Interpretation of ground subsidence surveys- a case study. Journal of Geospatial Engineering, vol.6, No. 1.
- CUI X., MIAO X., WANG B. J., YANG S., LIU H., SONG Y., LIU H., HU X. 2000 - Improved prediction of differential subsidence caused by underground mining. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 37, ss. 615-627.
- FILCEK H., WALASZCZYK J., TAJDUŚ A. 1994 - Metody komputerowe w geomechanice górniczej. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice.
- GHABRAIE B., REN G., ZHANG X., SMITH J. 2015 - Physical modelling of subsidence from sequential extraction of partially overlapping longwall panels and study of substrata movement characteristics. International Journal of Coal Geology Elsevier, 140, 71-83.
- GHABRAIE B., REN G., SMITH J. 2017a - Characterising the multi-sem subsidence due to varying mining configuration, insights from physical. International Journal of Coal Geology Elsevier, 93, 269-279.
- GHABRAIE B., REN G., BARBATO J., SMITH J. 2017b - A predictive methodology for multi mining induced subsidence. International Journal of Coal Geology Elsevier, 93, 280-294.
- HU H., LIAN X. 2015 - Subsidence rules of underground coal for different soil layer thickness: Lu'an Coal Base as an example, China. Int. J. Coal Sci Technol. 2(3), ss. 178-185.
- JAROSZ A., KARMIS M., SROKA A. 1990 - Subsidence development with time – experiences from logwall operations in the Appalachian coalfield. International Journal of Mining and Geological Engineering, 8, ss. 261-273.
- JOFS M.A., SZMIELEW A.I. 1985 - Inżynieria geomechanika przy podziemnych razabotkach. Hedpa. Mockba.
- KNOTHE S. 1953 - Równanie profilu ostatecznie wykształconej niecki osiadania. „Archiwum Górnictwa i Hutnictwa” t. 1, z. 1.
- KNOTHE S. 1984 - Prognozowanie wpływów eksploatacji górniczej. Wydaw. „Śląsk”, Katowice.
- KNOTHE S. 1993 - Teoria Budryka-Knothe'go po latach. Szkoła Eksploatacji Podziemnej '93, t. 2. CPPGSMiE PAN, Kraków.
- KOCHMAŃSKI T. 1956 - Obliczenia ruchów punktów górotworu pod wpływem eksploatacji podziemnej. PAN. Warszawa.
- KOWALSKI A., WALENTEK A. 2013 - Wpływ eksploatacji częściowej, w tym chodnikami, na deformacje powierzchni. Sbornik referatu Mezinarodni konferencie „Geodezie a Dulni merictvi 2013. XX. konference SDMG. Milin, Czechy. 2-4.10.2013 r., s. 105-116.
- KOWALSKI A. 2015 - Deformacje powierzchni w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym. Wydawnictwo Głównego Instytutu Górnictwa.
- KRATZSCH H. 2008 - Bergschadenkunde. Bochum, Deutscher Markscheider-Verein e.v. Auflage 5. Bochum.
- KWAŚNIEWSKI M., WANG J. 1994 - Symulacja komputerowa eksploatacji pokładu węgla systemem ścianowym z zawalem stropu. Wyniki prac z realizacji projektu celowego nr 231/CS6-9/92 pt.: Wysoko wydajny kompleks ścianowy i nowa technologia wybierania węgla w KWK Staszic. Politechnika Śląska, Gliwice.
- LIU B.S., KOUHNA L. 1990 - Ruchy powierzchni spowodowane eksploatacją. „Przegląd Górniczy” nr 4.
- MILCZAREK W. 2011 - Analiza zmian powierzchni górotworu po zakończonej eksploatacji górniczej w wybranym rejonie dawnego Wałbrzyskiego Zagłębia. Politechnika Wroclawska, (praca doktorska).
- SALAMON M.G. 1989 - Subsidence prediction using a laminated linear model. Rock Mechanics as Guide for Efficient Utilization of Natural Resources, Khair (ed). Balkema. Rotterdam, ss 503-509.
- SZOSTAK-CHRZANOWSKI A., CHRZANOWSKI A., HIROJI A. 2011 - Ground subsidence modelling based on stress redistribution in rock mass (Modelowanie osiadania terenu w oparciu o zmianę rozkładu naprężeń w górotworze). Prace Naukowe GIG. XI Dni Miernictwa Górniczego i Ochrony Terenów Górniczych. Kwartalnik „Górnictwo i Środowisko”, s. 524-536.
- TAJDUŚ A., CAŁA M., TAJDUŚ K. 2012 - Geomechanika w budownictwie podziemnym. Projektowanie i budowa tuneli. Wydawnictwa AGH. Kraków.
- TAJDUŚ K. 2007 - Numeryczne określanie metodą elementów skończonych wpływu eksploatacji podziemnej na powierzchnię terenu. „Przegląd Górniczy” nr 5, s. 36-42
- TAJDUŚ K. 2009 - New method for determining the elastic parameters of rock mass layers in the region of underground mining influence. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science, Elsevier, vol. 46, No 8, pp1296-1305.
- TAJDUŚ K. 2013 - Numerical simulation of underground mining exploitation influence upon terrain surface. Archives of Mining Sciences, vol. 58. No 3, pp. 605-616.
- Subsidence Engineers Handbook (SEH) 1975 - National Coal Board Mining Department.
- WARCZALA E. 2015 - Zintegrowana analiza deformacji górotworu w otoczeniu filarów ochronnych szybów. Politechnika Wroclawska (praca doktorska).
- WESOŁOWSKI M. 2001 - Wybrane aspekty modelowania numerycznego ruchów górotworu pod wpływem eksploatacji podziemnej i jej oddzia-

- lywania na obiekty. Politechnika Śląska. Wydział Górnictwa i Geologii. Gliwice (praca doktorska).
- WESOŁOWSKI M. 2014 - Możliwości stosowania modeli numerycznych do opisu deformacji powierzchni terenu górniczego. „Przeгляд Górnicy” nr 4, s. 15-22.
- WESOŁOWSKI M. 2013 - Zastosowanie liniowego ośrodka transwersalnie izotropowego do modelowania deformacji terenu górniczego. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice .
- WESOŁOWSKI M. 2016 - Numerical modeling of exploitation relics and faults influence on rock mass deformations. Archives of Mining Sciences, vol. 61. No 4, pp. 893-906.
- WHITTAKER D.N., REDDISH D.J., 1989 - Subsidence. Occurrence, Prediction and Control. Elsevier. Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo.
- ZHANG J., SUN Q., ZHOU N., HAIQIANG J., GERMAIN D., ABRO S. 2016 - Research and application of roadway backfill coal mining technology in western coal mining area. Arab J. Geosci. 9:558, ss.1-10.

Artykuł wpłynął do redakcji – październik 2017
Artykuł akceptowano do druku 10.11.2017
