



Podstawowe problemy ochrony powierzchni i górotworu w górnictwie solnym

Main problems of surface and rock mass protection in Polish salt mines

Dr hab. inż. Grzegorz Kortas^{*)}

Treść: Praca zawiera przegląd podstawowych problemów ochrony powierzchni nad podziemnymi i otworowymi kopalniami soli w Polsce. Wskazano, że objawy konwergencyjnego zaciskania wyrobisk i wykształcania się obniżen na powierzchni terenu różnią się w czasie, który podzielono na trzy fazy od powstawania wyrobisk do całkowitego ich zaśnieżenia. Przedstawiono wskaźniki i funkcje określające oddziaływania wyrobisk na górotwór i powierzchnię terenu. Pokazano przykłady zastosowania modeli fenomenologicznych i fizycznych do wyjaśniania i prognozowania zjawisk geomechanicznych w górotworze i na powierzchni terenu. Pokazano objawy trzech typów kształtowania się rozkładu obniżen terenu nad kopalniami soli. Przyczyną szeregu deformacji nieciągłych były wdarcia wód do kopalń podziemnych oraz niekontrolowane ługowanie w kopalniach otworowych. Wskazano na potrzebę sformułowania nowej kategoryzacji terenu górniczego, obejmującej bardzo wolne i bardzo szybkie oddziaływania oraz dostosowanej do tego profilaktyki budowlanej. Ze względu na długotrwałe oddziaływania na środowisko nieczynnych kopalń soli, potrzebna jest prawna regulacja zapewniająca nadzór, obserwację i bezpieczną gospodarkę na terenach pogórnich, w tym także odbieranie solanki wyciskanej z wyrobisk. W pracy zamieszczono przykłady obserwowanych oddziaływań wyrobisk kopalń soli na powierzchnię terenu ilustrowane na 25 rysunkach

Abstract: This paper presents an overview of the main problems of surface protection above the underground and salt well mines in Poland. It was stated that the signs of convergent tightening of excavations and formation of surface subsidence vary over time. The time was divided into three phases, from the formation of excavation to its complete tightening. Indicators and functions determining the influence of the excavation on the surface and rock mass were presented. The analysis of examples of phenomenological and physical models for explaining and forecasting the geomechanical phenomena in the surface and rock mass was included as well. Signs of three types of subsidence pattern formation above the salt mines were presented. The cause of a series of discontinuous deformations was the inrush of water into the underground mines and uncontrolled leaching in well mines. This paper points the need to formulate new criteria for mining area which would comprise very slow and very rapid influences as well as the building prevention for this purpose. Due to the long-lasting influence on environment of the dormant salt mines it is necessary to enforce a legal provision which shall provide supervision, observation and safe management in post-mining areas, including receiving the brine extruded from excavations. This paper shows examples of the observed influences of salt mine excavations on the surface which is illustrated in 25 figures.

Słowa kluczowe:

kopalnie soli, ochrona powierzchni, osiadania, zapadliska, kategorie górnicze, tereny pogórnice

Key words:

salt mines, surface protection, subsidences, hollows, mining categories, post-mining areas

1. Wprowadzenie

Działalność górnicza w złożach soli prowadzona jest w czterech rejonach Polski: na południu w płytkich miocen-skich złożach pokładowych, w wysadach solnych w centralnej Polsce, na zachodzie w pokładowym złożu w rejonie LGOM oraz w pobliżu Zatoki Puckiej. W kopalniach podziemnych sól kamienną wydobywa się z wysadu w Kłodawie oraz z pokładu soli nad złożem miedzi w Sieroszowicach. Średniowieczne kopalnie podziemne w Wieliczce i Bochni zakończyły eksploatację pod koniec XX w. i po wpisaniu na listę Światowego Dziedzictwa Kulturalnego i Naturalnego UNESCO obecnie pełnią funkcje turystyczne i lecznicze.

Eksploatację metodą ługowniczą początkowo prowadzono w Inowrocławiu, potem w Baryczy k. Krakowa i Łęzkowicach k. Bochni, a także w podziemnych kopalniach: w Inowrocławiu, Wieliczce i w Bochni. Obecnie otworową metodą ługowania tworzy się kawerny dla magazynowania paliw płynnych i gazu w Górze k. Inowrocławia i Przyjmie k. Mogilna oraz w Kosakowie k. Gdyni. Odbiorcami soli jest przemysł chemiczny, spożywczy i drogownictwo, a właścicielami podziemnych magazynów węglowodorów PGNiG i PKN Orlen.

Niewielki potencjał gospodarczy przy odrębności warunków geologiczno-górnich powoduje, że złożona problematyka inżynierska górnictwa solnego jest mało znana, a w wielu starszych i nowszych pracach monograficznych i podręcznikach dotyczących ochrony terenów górniczych

^{*)} Instytut Mechaniki Górotworu PAN

nie jest przedstawiana [np. 7, 27, 34,38]. Przyczyną tego jest z jednej strony brak potrzebnych badań i regulacji prawnych uwzględniających specyfikę górnictwa solnego, a z drugiej ograniczona przydatność teorii, metod i technologii stosowanych w innych rodzajach górnictwa.

Odrębne warunki geologiczne-górniczne pokładowych i wysadowych złóż soli, których konsekwencją jest rozpiętość głębokości prowadzenia eksploatacji od 40 do 1700 m, poziome lub pionowe ułożenie struktur górniczych, sposób urabiania złożeń czy wypełnienia wyrobisk powodują różnorodność oddziaływań na górotwór i tereny górnicze. Istotną wspólną cechą tych warunków jest pozostawianie filarów i półek w polach górniczych oraz calizn ochronnych w otoczeniu wyrobisk, przez co utrzymywana jest długotrwała stateczność górotworu oraz izolacja wyrobisk od wód.

Artykuł ma charakter szkicu przeglądowego, pokazującego charakterystyczne związki konwergencji i obniżen terenu z czasem, stosowane modele oddziaływań wyrobisk na górotwór, podobieństwa i różnice w kształtowaniu się wpływów kopalń podziemnych i otworowych na środowisko, w tym przede wszystkim na tereny górnicze.

2. Objawy ruchu górotworu - konwergencja i obniżenia powierzchni terenu

Powszechnie uznaje się, że skały solne wykazują wybitne cechy reologiczne [np. 5]. Przejawem oddziaływań reologicznych *in situ* jest długotrwały proces zaciskania wyrobisk, obserwowany w pomiarach konwergencji i obniżeniach powierzchni, który wyrażać można najprościej potęgowymi i wykładniczymi funkcjami czasu.

Wyróżnić można trzy fazy zaciskania [20]: 1 – okres powstawania wyrobiska, 2 – okres pełzania z zachowaniem *quasi* – ciągłości otoczenia, 3 – okres po powstaniu odspojen i obwałów z dominacją odkształceń objętościowych (rys. 1). We wszystkich fazach prędkość konwergencji zależy od sprężystych i lepkich właściwości górotworu oraz tworzenia się i rozwoju deformacji nieciągłych.

W pierwszej fazie szybkość zaciskania powiązana jest z prędkością powiększania się wyrobiska i osiąga maksimum w chwili rozpoczęcia drugiej fazy zaciskania (pkt. P, rys. 1).

Obserwacje wskazują, że w drugiej fazie zaciskania, w czasie od t_1 do t_2 , konwergencje liniowe k i objętościowe k_v określa na ogół funkcja potęgowa czasu w postaci

$$k(t) - k(t_1) = k_j [(t - t_1) / t_j]^m, \tag{1}$$

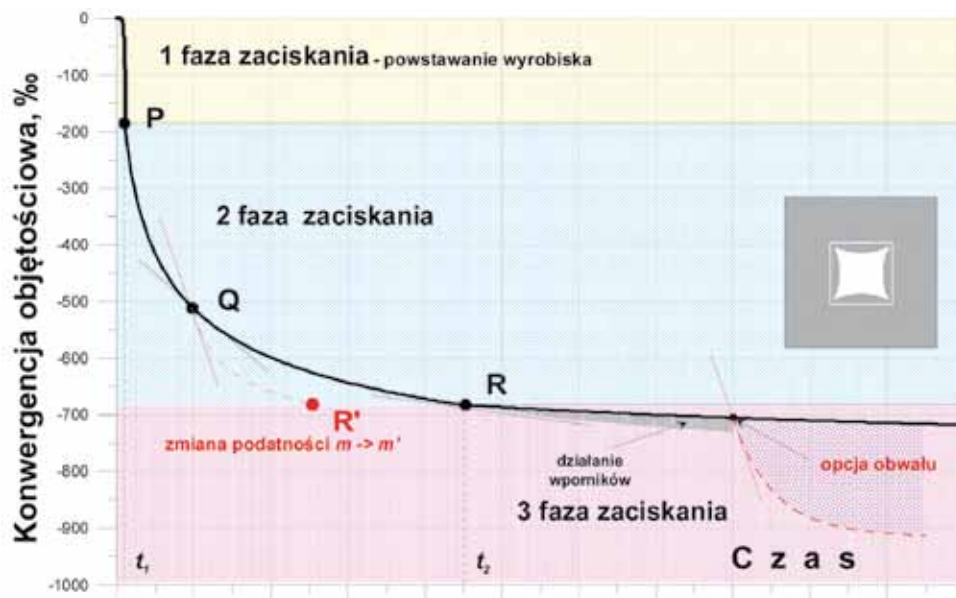
gdzie k_j – jest konwergencją w czasie jednostkowym t_j (np. $t_j=1$ rok), a $m < 1$ jest parametrem. Związek (1) zapisać można także w wartościach względnych dla $\xi = k/l$ lub $\xi_v = k_v/V$, gdzie l jest długością bazy pomiarowej, a V objętością wyrobiska. Wzrost wilgotności, temperatury czy pojawienie się masowych zamkniętych spękań calizny powoduje spadek oporów tarcia dynamicznego, czyli wzrost podatności na pełzanie. Zaznacza się to w obserwacjach większą prędkością konwergencji i zmniejszeniem wartości parametru potęgowego m oraz prowadzi do skracania tej fazy zaciskania (pkt. R → R', rys. 1). Okres $t_2 - t_1$ przedłuża się przez postawienie obudowy lub skraca się, jeżeli nastąpi obwał ociosów. Druga faza znika, gdy zawał wystąpi w czasie $t_1 = t_2$.

W trzeciej fazie, w czasie $t > t_2$ rozwijają się spękania otwarte i obwały skał, tworząc w wyrobisku początkowo skalne wsporniki, potem usypisko. Wtedy dominujące w zaciskaniu zmiany objętościowe ośrodka wyraża wykładnicza funkcja czasu w postaci

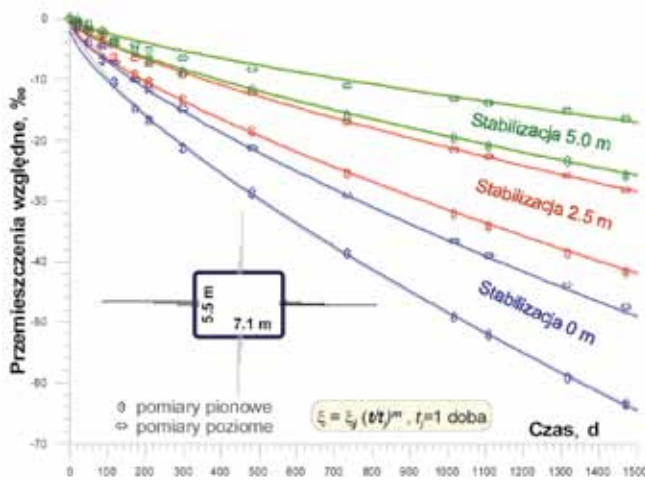
$$k(t - t_2) = \Delta k [1 - e^{-c(t - t_2)}], \tag{2}$$

gdzie Δk jest przyrostem konwergencji, a c jest jednostkową prędkością. Strefa obwału, rozluźnień i wypełnionej rumośzem skalnym pustki, ulec może całkowitemu zaciśnięciu, tworząc wtórny utwór skalny, niekiedy z fragmentami obudowy, jak np. w kopalni Bochnia. Na małej głębokości i przy znacznej powierzchni stropu komory obwały doprowadzić mogą do zawału sięgającego powierzchni terenu, jak to wystąpiło w 1960 r. nad komorą Schmidt w Wieliczce.

Konwergencja powiązana jest z przemieszczeniami w bliskim otoczeniu wyrobiska. Przykładem tego mogą być wyniki pomiarów w chodniku na głębokości 900 m w kopalni soli w Sieroszowicach (rys. 2). Znaki zastabilizowano tam na ociosie i w caliźnie na głębokości 2,5 i 5 m w osiach chodnika. Z obserwacji wynika, że ze wzrostem oddalenia od ociosów zmniejszają się wartości przemieszczeń w kierunkach osiowych. Wszystkie względne konwergencje i przemieszczenia są prostymi funkcjami potęgowymi z parametrem $m \in [0,695, 0,725]$.



Rys. 1. Trzy fazy zaciskania wyrobiska
Fig. 1. Three phases of excavation tightening



Rys. 2. Względne przemieszczenia i konwergencje chodnika w kopalni soli Sierszowice [31]; współczynniki funkcji (1) i długości baz pomiarowych:

poziomych: $m=0.725$; $\xi_j \in [0,245\%, 0,140\%, 0,085\%]$, $l \in [7,1 \text{ m}, 12,1 \text{ m}, 17,1 \text{ m}]$

pionowych: $m=0.695$; $\xi_j \in [0,400\%, 0,260\%, 0,160\%]$, $l \in [5,5 \text{ m}, 10,5 \text{ m}, 15,5 \text{ m}]$

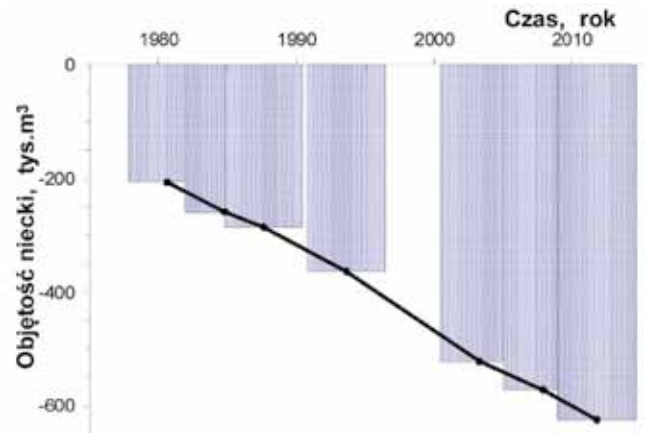
Fig. 2. Relative displacements and convergences of heading in salt mine "Sierszowice" [31]; coefficients of functions (1) and lengths of measuring bases:

Z sumą przyrostów konwergencji wyrobisk k_v powiązana jest objętość niecki obniżen $V_N < 0$ i odkształcenia objętościowe calizn. Wskaźnikiem oddziaływań wyrobisk na górotwór jest α :

$$\alpha(t) = V_N(t) / k_v(t) < 1. \quad (3)$$

Im α jest bliższe 1, tym suma odkształceń objętościowych górotworu jest bliższa zeru. Określanie konwergencji objętościowej wyrobisk oraz objętości niecki obniżen służyć może zatem wielkoskalowej ocenie stanu górotworu.

Objętość niecki obniżen określa się na podstawie okresowych niwelacji reperów. Przykładem narastania objętości niecki w czasie jest wykres na rysunku 3.



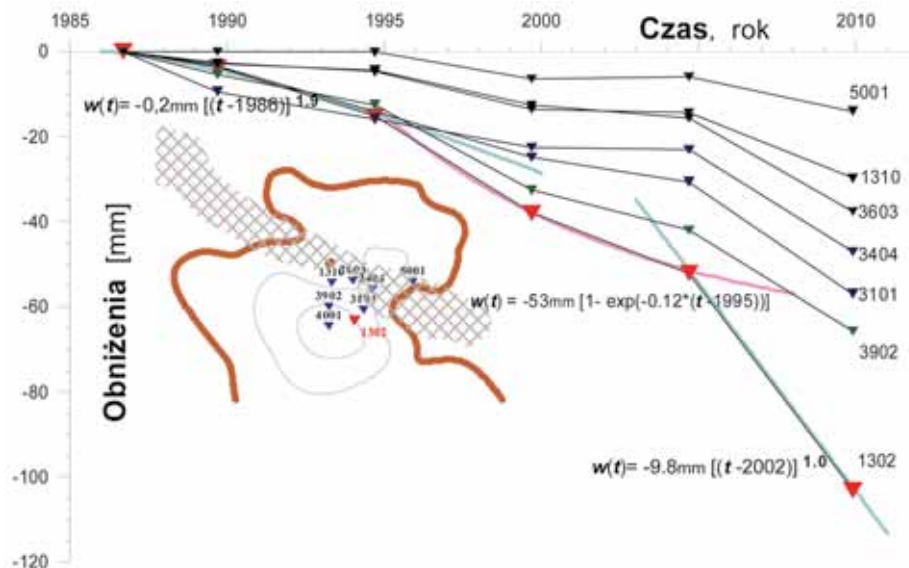
Rys. 3. Narastanie objętości niecki obniżen powierzchni w Bochni w okresie 1978 ÷ 2011 r.

Fig. 3. Build-up of volume of the surface subsiding trough in Bochnia between 1978 and 2011

Wartości $\alpha \ll 1$ sygnalizują utrzymywanie się w górotworze znacznych objętościowych odkształceń rozciągających. Może się zdarzyć, że $\alpha > 1$, wtedy obniżenia powierzchni wynikają z oddziaływań na górotwór wyrobisk nieuwzględnianych w bilansie konwergencji.

Zaciskanie kopalń, pól górniczych i pojedynczych wyrobisk różni się skalą, ale objawy zjawiska są analogiczne. Podobnie, jak w otoczeniu wyrobiska, nad strukturą górnica kopalni czy pola występują obniżenia, pod dolnymi poziomami – wypiętrzenia, a boczne otoczenie struktury ulega przemieszczeniom poziomym. Wyróżnić tu można także trzy fazy zaciskania kopalni czy pola. Ich dostępnym do obserwacji objawem są przemieszczenia na powierzchni terenu, a niekiedy również w górotworze. Związki z czasem objętości niecki obniżen $V_N(t)$ czy przemieszczeń pionowych punktów obserwacyjnych $w(t)$ wyrażają także funkcje potęgowe typu (1), a gdy dominują odkształcenia objętościowe – typu (2).

W pierwszej fazie, gdy postępuje rozwój przestrzenny kopalni, do zakończenia eksploatacji, parametry k_v i m i zmienne funkcji potęgowej (1) opisującej tu obniżenia $w(t)$ zależą od prędkości konwergencji struktury kopalni i od wydobytej objętości złoża V_w . Generalnie prędkości obniżen w tej fazie zwiększają się i parametr funkcji potęgowej jest $m \geq 1$, jak na przykład obserwuje się to nad kopalnią w Mogilnie [32] (rys. 4).



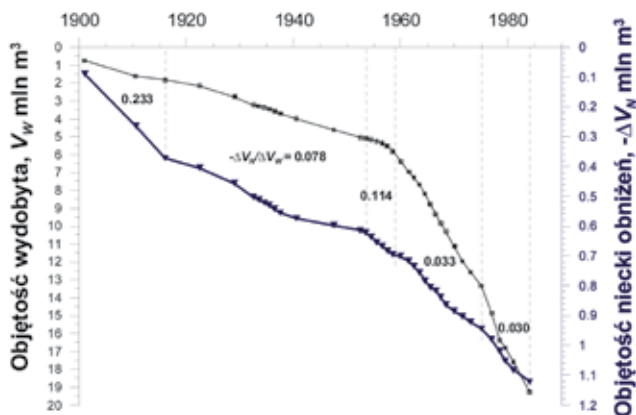
Rys. 4. Obniżenia reperów nad kopalnią „Mogilno” w latach 1987 ÷ 2010 [mm]

Fig. 4. Subsidence of bench-marks above "Mogilno" mine between 1987 and 2010 [mm]

Wskaźnik $\delta(\Delta t)$ wyraża okresowy stosunek przyrostu konwergencji $\Delta k_v(t)$ do przyrostu wydobytej objętości złoża $\Delta V_w(t)$

$$\delta(\Delta t) = -\frac{\Delta k_v}{\Delta V_w} \quad (4), \quad \delta(\Delta t) = -\frac{\Delta V_N}{\alpha \Delta V_w} \quad (5)$$

Jeżeli przyrosty konwergencji $-\Delta k_v$ są bliskie ΔV_w , to $\delta(\Delta t) \sim 1$, jak na przykład w kawernach ługowniczych na głębokości 2 km w rejonie Hengelo w Holandii. Spowodowane jest to znaczną podatnością na pęcznienie skał solnych w wysokich temperaturach na tej głębokości. Wprowadzając związek (3) do (4), wskaźnik $\delta(\Delta t)$ powiązać można w (5) ze stosunkiem $\Delta V_N/\Delta V_w$, czyli wielkościami dostępnymi do pomiaru. Przy stałej wartości α wskaźnik $\delta(\Delta t)$ jest proporcjonalny do $\Delta V_N/\Delta V_w$. Z analizy obserwacji obniżenia terenu w Inowrocławiu (rys. 5) wynika, że w każdym z pięciu wydzielonych okresów eksploatacji złoża wartość $\Delta V_N/\Delta V_w$ była stała, najmniejsza w latach 1959 ÷ 1984, kiedy prowadzona była eksploatacja w kopalni Solno.



Rys. 5. Wydobycie i objętość niecki osiadań w Inowrocławiu [mln m³]

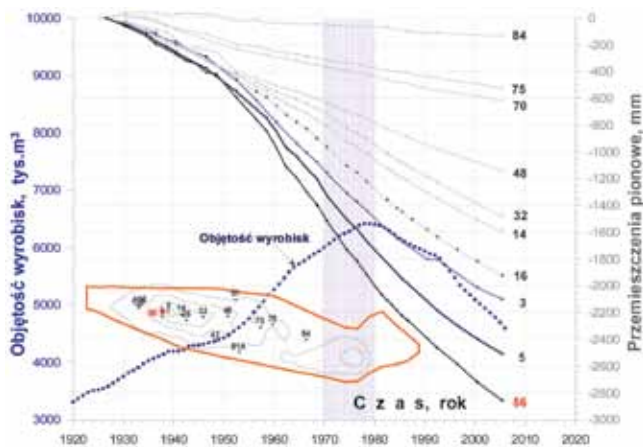
Fig. 5. Exploitation and volume of subsiding troughs in Inowrocław [mln m³]

Objętość kopalni V_K jest sumą objętości wydobytej kopaliny i ujemnej konwergencji objętościowej pomniejszoną o objętość stałego materiału wypełnienia wyrobisk V_p , czyli

$$V_K = V_w + k_v - V_p \quad (6)$$

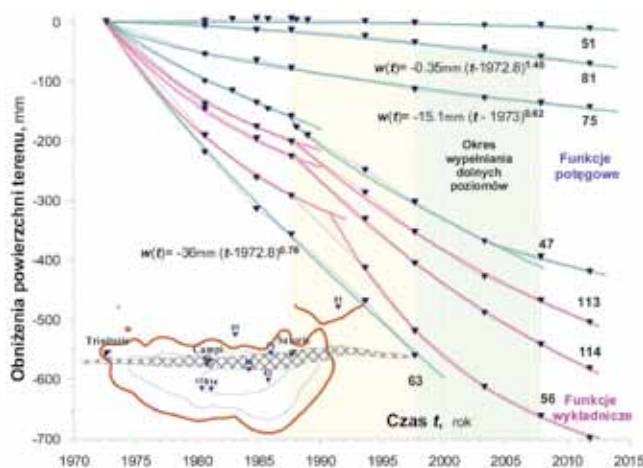
W końcowym okresie eksploatacji w kopalni Wieliczka łącznie z wydobyciem postępowało wypełnianie wyrobisk materiałem stałym do 1978 r. Rosnące także do 1978 r. prędkości obniżenia powierzchni terenu w następnych latach zmniejszały się (rys. 6). Zatem w tym przypadku przejście do drugiej fazy zaciskania nie jest ściśle powiązane z zakończeniem eksploatacji w 1994 r., ale z czasem wystąpienia maksimum objętości wyrobisk.

Po zakończeniu eksploatacji złoża, w drugiej fazie prędkość zaciskania generalnie maleje [20]. W Bochni obserwowano odchylenie od długookresowego trendu zmniejszania się prędkości obniżenia powierzchni (rys. 7). W latach 1985 ÷ 1990 pojawiały się okresowo wzrosty i spadki prędkości obniżenia. Wiązać to można z wpływami procesów deformacji na dolnych poziomach kopalni. Potem w latach 1996 ÷ 2006 wypełniano dolne poziomy kopalni materiałem podsadzkowym. Analiza obserwacji wykazała, że obniżenia poszczególnych punktów na powierzchni określają: na obrzeżu niecki – sumy funkcji potęgowych ze stałą w całym okresie obserwacji wartością m , a w centrum niecki – sumy funkcji wykładniczych ze stałą wartością Δk (rys. 7).



Rys. 6. Obniżenia reperów nad kopalnią w Wieliczce w latach 1926 ÷ 2006 [mm]

Fig. 6. Subsidence of bench-marks above the mine in Wieliczka between 1926 and 2006 [mm]



Rys. 7. Obniżenia reperów nad kopalnią w Bochni w okresie od 1972 do 2011 [mm]

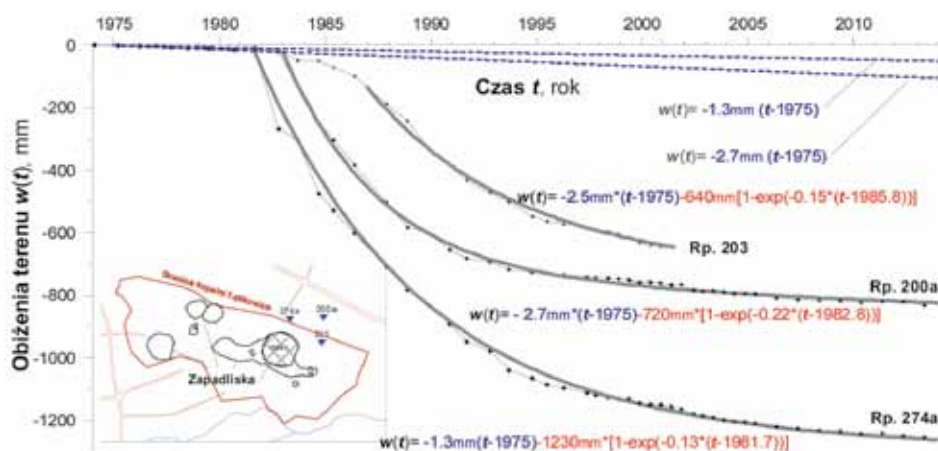
Fig. 7. Subsidence of bench-marks above the mine in Bochnia between 1972 and 2011 [mm]

Trzecia faza zaciskania, charakterystyczna dla skutków eksploatacji „na zawal”, nad polskimi kopalniami soli nie była obserwowana. Pojawiała się na przykład w niemieckich kopalniach soli po równoczesnym zniszczeniu szeregu nadmiernie wyciężonych filarów. Występowały przy tym wstrząsy górotworu i zapadliska [33]. Symptodem podobnego procesu były nagłe lokalne obniżenia terenu z ujawnieniem się zapadliska nad otworową kopalnią soli Łęzkowice (rys. 8).

Przed 1982 r. obserwowano w Łęzkowicach charakterystyczne dla obrzeża pola obniżenia ze stałą prędkością do -2,5 mm/rok. Po wystąpieniu w pobliżu tego rejonu obwałów w kawernach i pojawieniu się zapadliska, nastąpił szybki wzrost obniżenia terenu, dążąc wykładniczo w następnych latach do asymptoty – funkcji potęgowej z parametrem $m = 1,0$ (rys. 8).

3. Rozkłady obniżenia na powierzchni terenu

Celem obserwacji na terenach górniczych jest: okresowa kontrola oddziaływania wyrobisk na powierzchnię terenu, określenie rozkładu obniżenia, oszacowanie zasięgu wpływów, okresowych przyrostów obniżenia reperów i objętości



Rys. 8. Obniżenia reperów przy granicy złoża w Łęzkowicach w okresie 1974 ÷ 2001 [mm]

Fig. 8. Subsidence of bench-marks at the deposit border in Łęzkowice between 1974 and 2001 [mm]

niecki oraz pośrednio kontrola stanu górotworu. Pomiary na wszystkich terenach nad czynnymi i nieczynnymi kopalniami soli, polegają na okresowych niwelacjach precyzyjnych sieci punktów rozproszonych, obecnie w odstępach około 5-letnich. Nieuzasadniony wyjątek stanowi brak obserwacji w Inowrocławiu po kontrolowanym zatopieniu kopalni Solno w 1994 r.

Ze względu na nieznaczne okresowe przyrosty obniżen powierzchni wiarygodność wyników pomiarów istotnie zależy od stałości punktów dowiązania pomiarów niwelacyjnych. Obserwacje wskazują, że zasięg wpływów zależy od warunków geologiczno-górnictwowych, ale maksymalny jest na ogół dwukrotnie większy niż największa głębokość wyrobisk.

Cechą rozkładu obniżen terenu jest położenie lokalnych maksimum przemieszczeń pionowych względem koncentracji wyrobisk. Niecki w Inowrocławiu [11] czy Wieliczce (rys. 9) charakteryzuje centryczność. W odmiennych warunkach geologiczno-górnictwowych, jak w Mogilnie (rys. 10) [24], w Górze i w Bochni (rys. 11) czy nad polem 2 w Kłodawie (rys. 12) największe obniżenia są niecentryczne i pojawiają się nad otoczeniem pola górnictwowego.

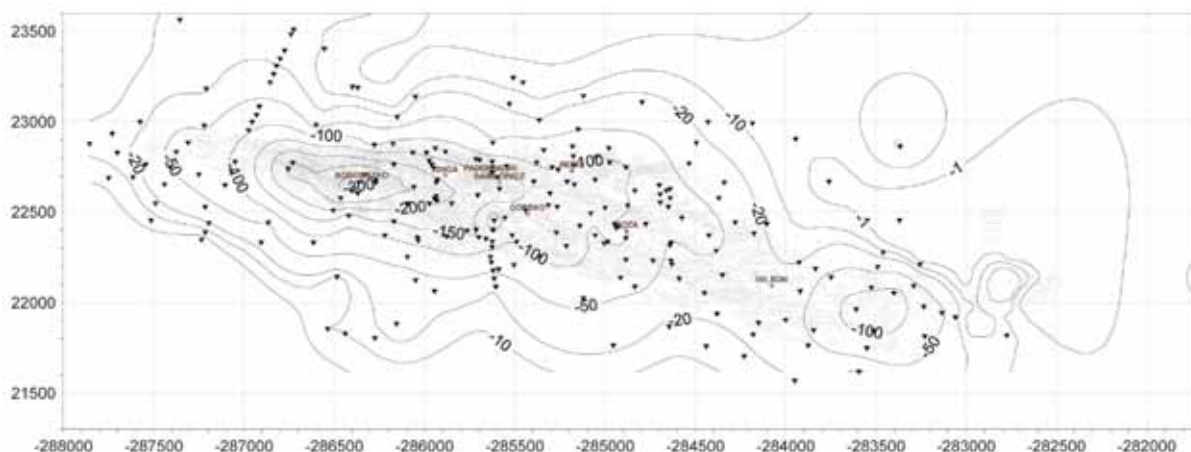
Przegląd oddziaływań polskich kopalń soli pokazuje, że na powierzchni terenów wykształcają się wyłącznie niecki niepełne. Przy znacznych zasięgach wpływów, prędkości obniżen są niewielkie, ale proces obniżen niezwykle długi. Zatem dopiero w okresie dziesiątek czy setek lat wpływy kopalń soli

na powierzchnię mogą ją istotnie zmienić. Maksymalne prędkości osiadań na terenach górniczych w Wieliczce i osiągały -45 mm/rok, a obecnie -20 mm/rok. W Bochni zmniejszyły się z -22 mm/rok do -12 mm/rok, a mimo tego nie obserwuje się wyraźnego zmniejszenia przyrostów objętości niecki obniżen (rys. 3). Należy podkreślić, że objętość niecki lub jej wybranego sektora, a nie maksymalne obniżenie, charakteryzuje zmieniającą się w czasie stan górotworu.

4. Modelowanie oddziaływań wyrobisk na górotwór i powierzchnię terenu

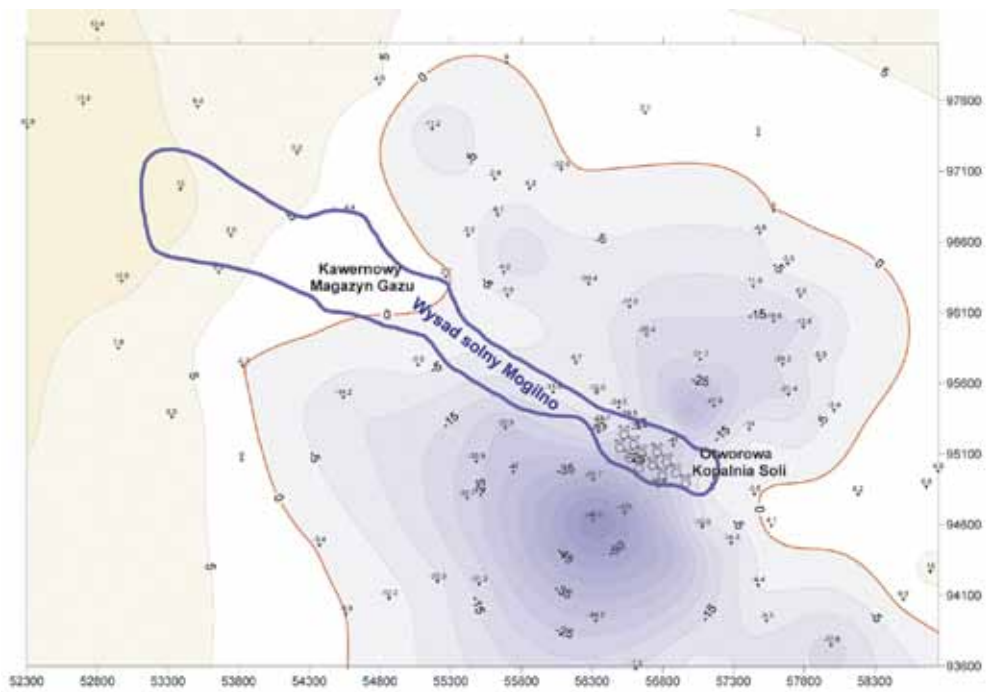
Obserwacje konwergencji wyrobisk, przemieszczeń górotworu i obniżen powierzchni pozwalają na wstępną objawową interpretację zachowania się górotworu i jego wpływu na tereny górnicze. Obecnie wymaga się jednak geomechanicznego ujęcia tego procesu z określaniem przemieszczeń oraz powiązaniem naprężeń z długością wytrzymałością skał w czasoprzestrzennych modelach sprężysto-lepkich. W Polsce dotyczy to przede wszystkim podziemnych magazynów gazu i paliw, ale także otworowych kopalń soli.

W związku z wykorzystaniem wyrobisk w złożach soli na składowiska odpadów radioaktywnych w krajach zachodnich w obliczeniach inżynierskich od dawna stosuje się geomechaniczne modele sprężysto-lepkie, głównie z potęg-

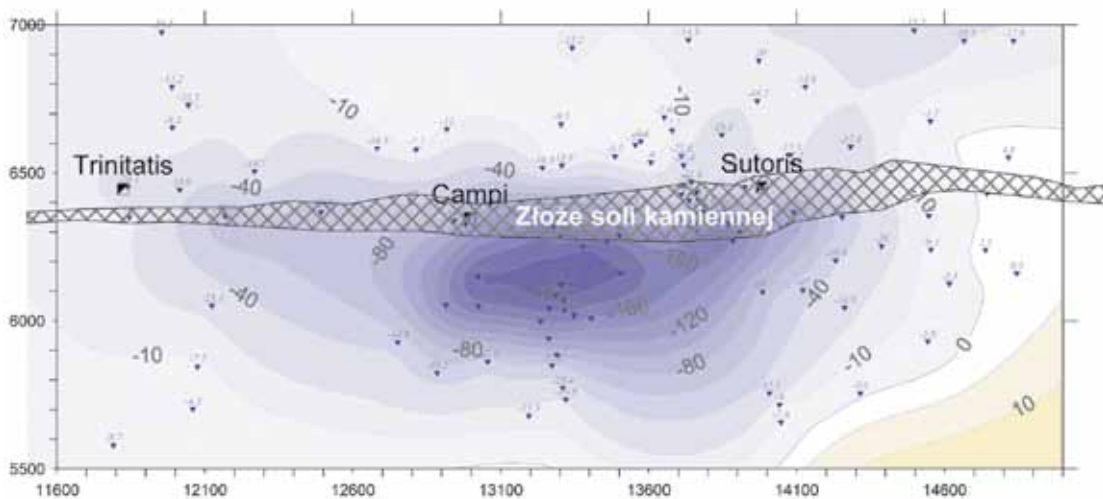


Rys. 9. Obniżenia terenu na kopalnię „Wieliczka” w okresie 1978 ÷ 1986 r. [mm]

Fig. 9. Subsidence of terrain above the “Wieliczka” mine between 1978 and 1986 [mm]



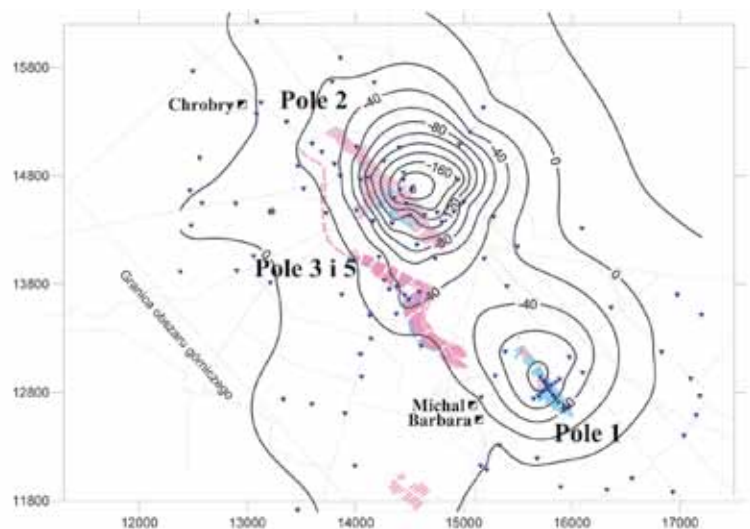
Rys. 10. Obniżenia terenu nad otworową kopalnią „Mogilno” II w okresie 1989 ÷ 2004 r. [mm]
 Fig. 10. Subsidence of terrain above the “Mogilno II” well mine between 1989 and 2004 [mm]



Rys. 11. Obniżenia terenu nad kopalnią „Bochnia” w okresie 1997÷2011 r. [mm]
 Fig. 11. Subsidence of terrain above the “Bochnia” mine between 1997 and 2011 [mm]

Rys. 12. Obniżenia terenu nad kopalnią Kłodawa w latach 1978÷2011 [mm], kolory komór powstałych w okresie: 1954÷1977r. – niebieski, 1978÷2011 r. – czerwony

Fig. 12. Subsidence of terrain above the “Kłodawa” mine between 1978 and 2011 [mm], colours of chambers formed in: 1954÷1977 – blue, 1978÷2011 – red



gowym prawem pełzania. Odształcenie ε jest wtedy sumą odształcenia sprężystego i lepkiego, $\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p$. Proste prawo pełzania Nortona – Bayle'a dla jednoosiowego naprężenia i odształcenia przedstawia się następująco

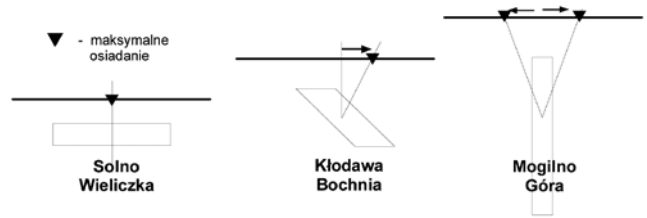
$$\dot{\varepsilon} = B \sigma^n t^m, \quad B = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \quad (4)$$

gdzie: σ jest naprężeniem, A , $n \geq 1$, $m \leq 1$ – to stałe materiałowe, t – czas, Q – energia aktywacji dla procesu pełzania, R – stała gazowa, T – temperatura, B – podatność na pełzanie dla temperatury $T = \text{const}$.

Polskie prace dla rozwiązań górniczych problemów magazynowania węglowodorów inicjowali K. Urbańczyk, A. Kunstmann i J. Ślizowski [37]. Fizyczne modele sprężysto-lepkie stosowane są obecnie w zaawansowanych obliczeniach geomechanicznych, wspomaganych obliczeniami numerycznymi metodą elementów czy różnic skończonych, np. programami CosmosM, Abacus czy Flack. Przykładem takich obliczeń dla niejednorodnego ośrodka 3D+t+T (zadanie przestrzenne z uwzględnieniem czasu t i temperatury T) były badania halokinetycznego podnoszenia wysadu solnego, konwergencji i przemieszczeń różnych zespołów kawern [17], przemieszczeń i konwergencji w chodnikach kopalni Sieroszowice [31], czy rozkładu naprężeń wokół podziemnego magazynu ropy i paliw (rys. 13).

Badania modelowe pozwoliły wyjaśnić przyczyny pojawiania się trzech typów sytuowania się niecek obniżen na powierzchni terenu (rys. 14) [17, 18].

Z badań modelowych ośrodka sprężysto-lepkiego [17] wynika, że jeżeli stosunek wysokości struktury do jej szerokości jest znacznie większy od 1, to przy bardzo długim poprzecznym wymiarze struktury na powierzchni terenu pojawia się niecka osobliwa z dwoma centrami obniżen, jak w Mogilnie (rys. 10). Jeszcze bardziej niezwykłe są wyniki modelowania rozkładu przemieszczeń nad strukturą otworowej kopalni soli w Górze, gdzie obserwowane jest wykształcanie się prawie kolistej strefy maksymalnych obniżen poza odniesieniem na powierzchnię granicy wyrobisk. Z badań tych wynika, że przyczyną takiego zachowania się górotworu jest dominacja przemieszczeń poziomych w otoczeniu pola górniczego, co spowodowane jest smukłością kawern o 20-krotnie większej wysokości niż ich średnice. Współdziałał w rozkładzie obniżen na powierzchni terenu halokinetycznego wypiętrzania się



Rys. 14. Typy usytuowania się niecek osiadań; typ 1 – Solno, Wieliczka, typ 2 – Kłodawa, Bochnia, typ 3 – Mogilno, Góra

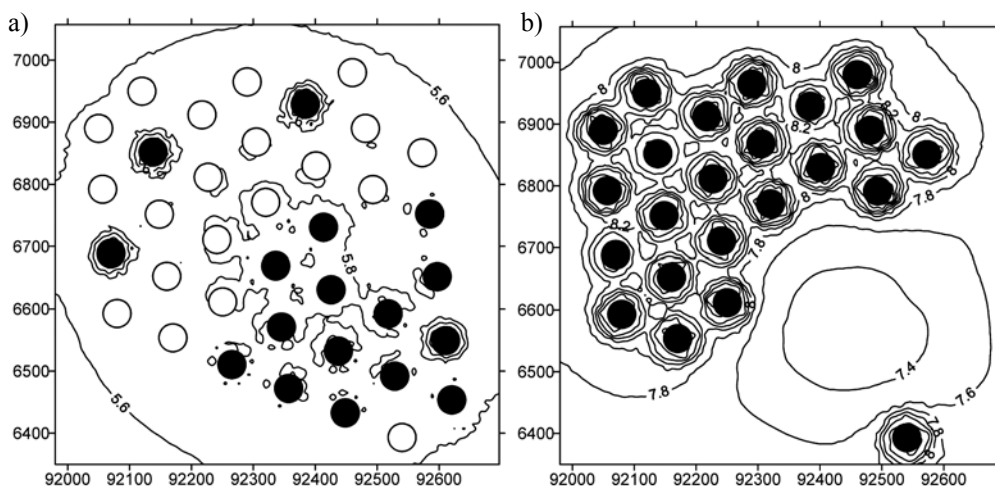
Fig. 14. Types of subsiding trough formation; type 1 – Solno, Wieliczka, type 2 – Kłodawa, Bochnia, type 3 – Mogilno, Góra

wysadu, aktywowanego przez zmniejszenie gęstości spowodowane wyrobiskami, może być przyczyną obserwowanego zróżnicowania zasięgu wpływów na terenach górniczych kopalni „Mogilno” (rys. 10).

Analizując przemieszczenia i odształcenia nad kopalniami soli trzeba zawsze powiązać je z czasem. Pierwszą w Polsce ilościową prognozę zachowania się powierzchni nad kopalnią soli w Wieliczce w 1968 r. oparł W. Batkiewicz na ekstrapolacji w czasie osiadań reperów. Wprowadzona dla kopalń węglowych kategoryzacja terenów górniczych [3] nie zawiera parametru czasu. Obecnie wiadomo, że ze wzrostem prędkości eksploatacji szkodliwość wpływów eksploatacji na zabudowę terenów rośnie. Przy małych prędkościach, zmniejsza się. Wobec braku innych rozwiązań i stosownych norm kategoryzacja z 1956 r. jest jednak nadal stosowana w górnictwie solnym.

Jej podstawowym wskaźnikiem jest wartość maksymalnego odształcenia liniowego ε_{max} . Przy znacznych głębokościach i pionowym wykształceniu struktur kopalń soli, a także rozproszeniu w przestrzeni i czasie powstawania wyrobisk komorowych czy kawern na powierzchni terenu pojawiają się wyłącznie niecki niepełne, dlatego uzasadnione jest wtedy określanie również składowej w kierunku prostym do kierunku ε_{max} oraz wyróżnianie odształceń ściskających i rozciągających.

Z powodu znacznej złożoności geometrycznej wielopoziomowych kopalń soli dla określenia odształceń terenów górniczych stosuje się nadal teorię całkową, wykorzystującą



Rys. 13. Rozkład naprężeń efektywnych [MPa] wokół kawern w Górze na głębokościach 750 m – a i 1350 m – b [23]

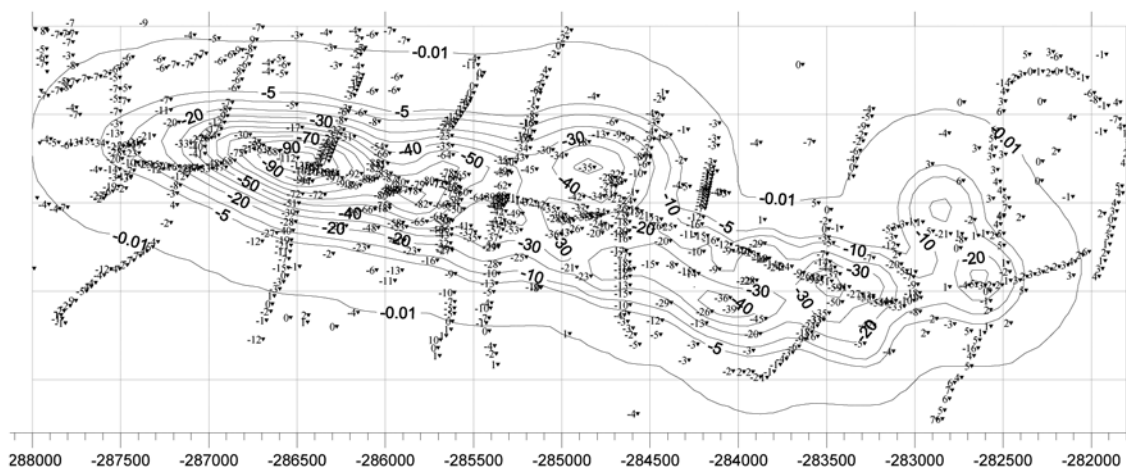
Fig. 13. Effective stress pattern [MPa] around the cavity in Góra at a depth of 750 m (fig. on the left) and 1350 m (fig. on the right) [23]

funkcję rozkładu normalnego Gaussa dla określania wpływów eksploatacji [8]. Dostosowując ją do warunków kopalń soli teoria ta poszerzona została o założenie, że przemieszczenia w górotworze są superpozycją rozproszenia obniżeń i wypiętrzeń spowodowanych konvergencją wyrobisk komorowych, wyrażonych funkcjami czasu [9]. Na tej drodze określone były wpływy wyrobisk nad kopalniami w Bochni, Inowrocławiu, Wieliczce i Kłodawie. Dalszy postęp, głównie szybkości obliczeń komputerowych spowoduje, że sposób ten zastąpią w przyszłości fizyczne metody modelowania oddziaływania wyrobisk na górotwór i powierzchnię.

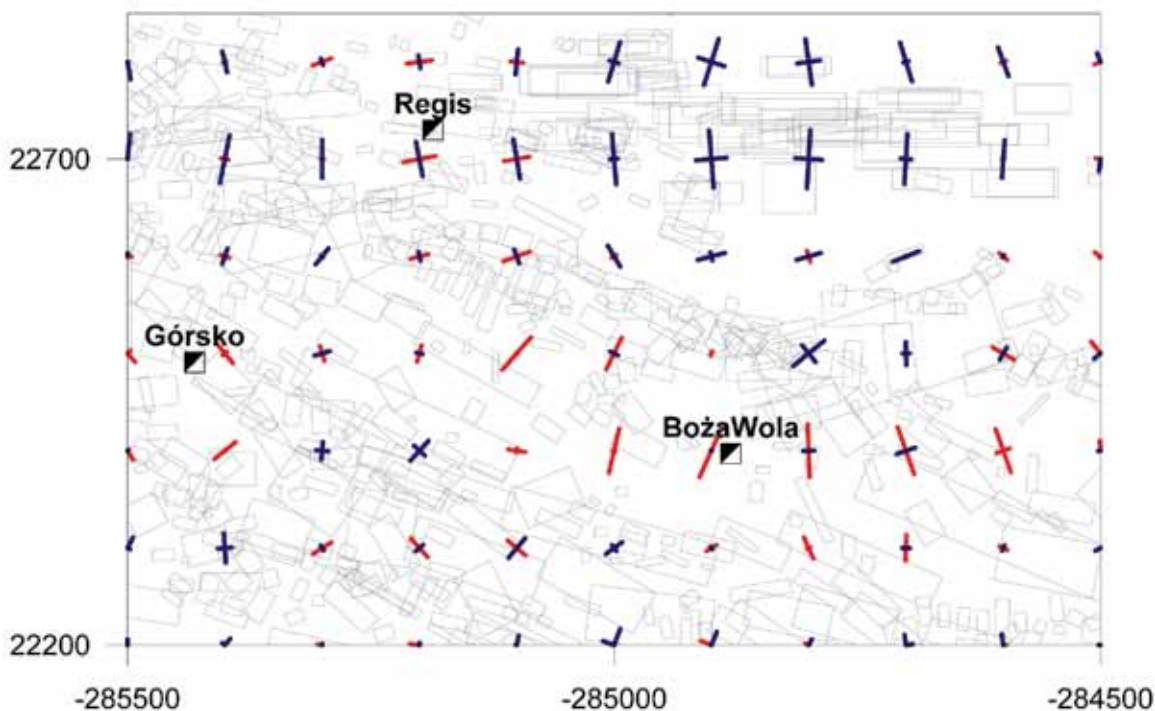
Opis oddziaływań kopalni Wieliczka na powierzchnię przedstawił J. Szewczyk [40], a przykład wyników modelowania z wykorzystaniem poszerzonej teorii funkcji wpływów pokazano na rysunku 15. Wycinek rozkładu odkształceń

terenu na tle rozmieszczenia modelowych komór pokazano na rysunku 16.

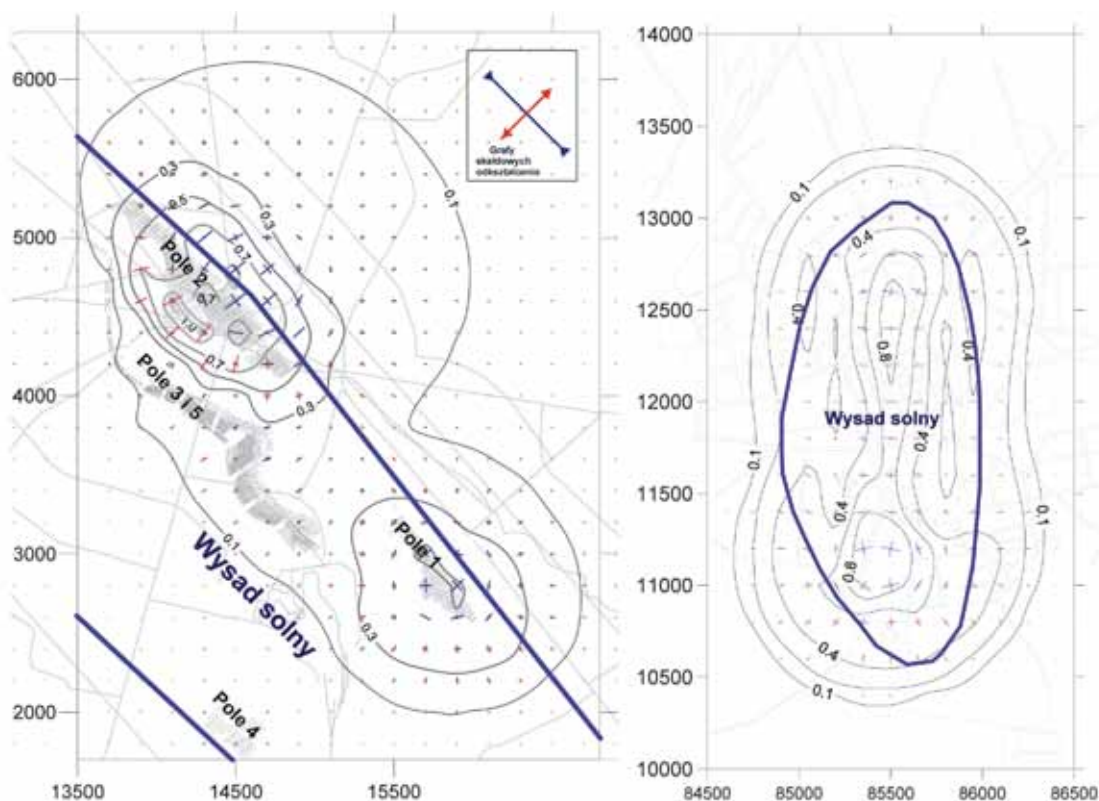
Dla potrzeb profilaktyki budowlanej obliczane są prognozowane *przyszłe* maksymalne przyrosty odkształceń liniowych, nachylenia i kategorie terenu we wskazanym przez Kopalnię przedziale czasu. Przykładem *dotychczasowych* oddziaływań wyrobisk są rozkłady odkształceń w okresie 58 lat, od początku eksploatacji złoża w Kłodawie (rys. 17) i 57 lat w Inowrocławiu (rys. 18). Ze względu na występujący nad polem 2 w Kłodawie 2 typ niecki, maksymalna wartość odkształcenia +1 ‰ występuje nad SW krawędzią pola 2 i w bliskiej odległości wpływy te zanikają. Po przeciwnej natomiast stronie pola 2, w kierunku NE występuje poszerzona strefa odkształceń ściskających, a dalej rozciągających.



Rys. 15. Niecka modelowa i obserwowane obniżenia w Wieliczce w okresie 1996 – 2000 [mm]
 Fig. 15. Model trough and observed subsidences in Wieliczka between 1996 and 2000 [mm]



Rys. 16. Prognozowany rozkład ekstremalnych poziomych składowych odkształcenia w Wieliczce w latach 2006 ÷ 2031; rozciągające – czerwone, ściskające – niebieskie
 Fig. 16. Predicted distribution of extreme horizontal deformation components in Wieliczka between 2006 and 2031; tensile – red, compressive – blue



Rys. 17. Odkształcenia terenu nad kopalnią Kłodawa 1952 ÷ 2010 r. [%]

Fig. 17. Ground deformations above “Kłodawa” mine between 1952 and 2010 [%]

Rys. 18. Odkształcenia terenu nad kopalnią Solno 1934 ÷ 1991 r. w Inowrocławiu [%]

Fig. 18. Ground deformations above “Solno” mine between 1934 and 1991 in Inowrocław [%]

Próba poszerzenia klasyfikacji terenów górniczych, przedstawiona w pracach [26, 36] polegała na wprowadzeniu w poszczególnych kategoriach dodatkowo klas zależnych od czasu. Drogą do sformułowania bardziej przydatnej klasyfikacji terenów górniczych mogłoby być powiązanie nachyleń, prędkości i przyspieszeń odkształceń objętościowych i postaciowych z czasem. Konsekwencją tego byłaby jednak konieczność odpowiedniego dostosowania do tego profilaktyki budowlanej lub zrezygnowanie z niej przy bardzo małych prędkościach odkształceń i niewielkich nachyleniach.

5. Zagrożenie powierzchni deformacjami nieciągłymi

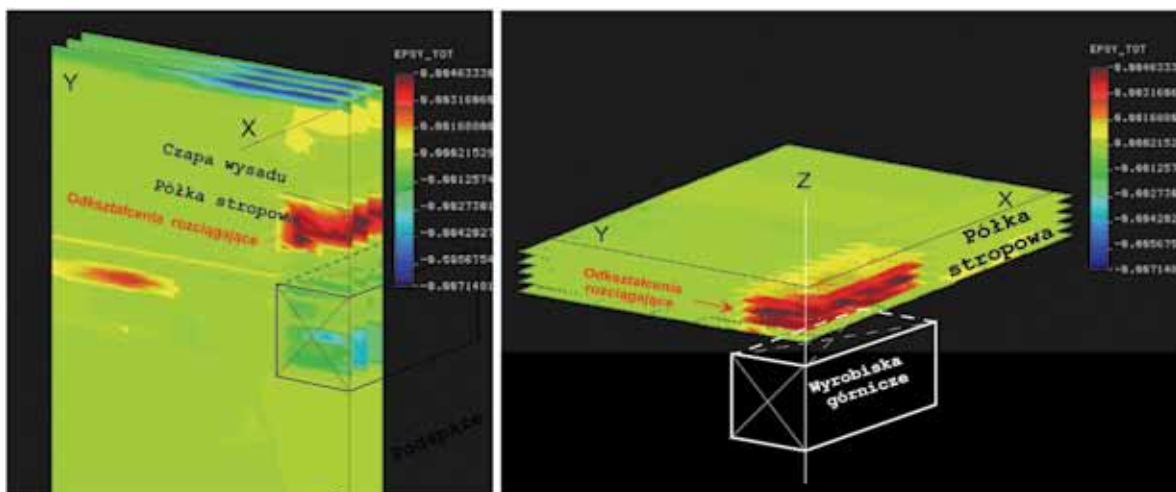
Deformacje nieciągłe na powierzchni terenu w obszarze wpływów wyrobisk solnych powstają w przypadku kopalń podziemnych: po wdarciu wód do wyrobisk i nad strefami zawału wyrobisk, a w przypadku kopalń otworowych: przy prowadzeniu ługowaniu złoża bez ochrony stropu i przy niekontrolowanemu czerpaniu solanek.

Podstawowym zagrożeniem górniczym w podziemnych kopalniach soli jest zagrożenie wodne, bo wdarcie wody prowadzić może do nieodwracalnego zatopienia kopalni i znacznych szkód górniczych [6, 21, 38]. Naturalne drogi migracji wód powstawać mogą w trakcie wiekowych procesów geologicznych i aktywizować się w wyniku naruszenia filarów ochronnych lub narastania odkształceń pod wpływem robót górniczych. Na pęknięcie narażone są sztywne skały, betonowe obudowy szybów [19], a także starzejące się betonowe wypełnienia otworów wiertniczych oraz tamy wodne, szczególnie wtedy, gdy otoczone są skałami podatnymi na pęcznienie.

W ostatnich latach przeprowadzono badania modelowe zachowania się półek stropowych nad wielopoziomową kopalnią soli w Wapnie (model 3D+t – rys. 19) [Kortas i Maj w 35] oraz w Kłodawie (model 2D+t – rys. 20) [23]. Przyjmując, że górotwór solny wykazuje właściwości sprężysto-lepkie, wykazano, że z upływem czasu w półce stropowej chroniącej kopalnię od wód narastają w czasie naprężenia i odkształcenia rozciągające w kierunkach poziomych. Ze względu na pionowe ułożenie w półkach stropowych warstw różniących się litologicznie, wystąpić mogą otwarte spękania, które w przypadku połączeń z horyzontem wodnym inicjować mogą migrację wód do wyrobisk.

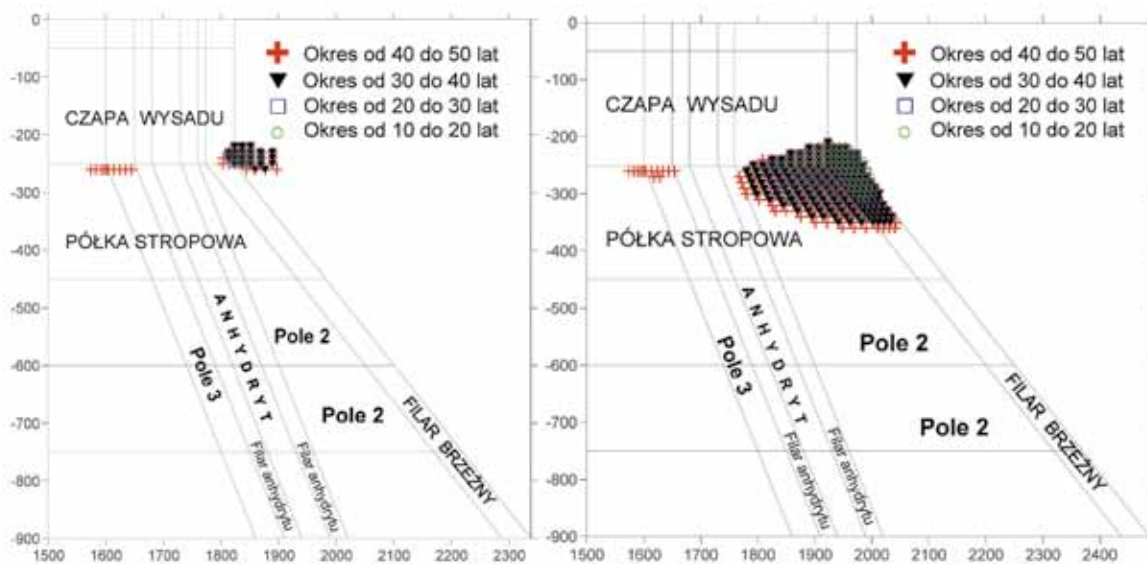
Potencjalne skutki wdarcia wód rosną z objętością wyrobisk, pojemnością i dopływem wody do horyzontów zagrożających kopalni. W Polsce wdarcia wody do podziemnych kopalń soli zdarzały się wielokrotnie. Intensywnym wdarciom wody zawsze towarzyszyły zapadliska na powierzchni. Zawały z zapadliskami i zatopieniem wyrobisk opisano w średniowiecznych raportach z lustracji królewskich Żup Solnych. W XX w. woda wdarła się do kopalni Kronprinz w Inowrocławiu w 1907 r., gdy chodnikiem poszukiwawczym szukano źródeł wycieku kopalnianego [1]. W Wieliczce wdarcie w 1992 r. nastąpiło w trakcie przebudowy poprzeczni Mina poza granicami złoża solnego w utworach krasu solnego.

Katastrofalnym określa się wdarcie wód w 1977 r. do kopalni soli w Wapnie, które wystąpiło po próbach uszczelniania górotworu przez wtłaczanie iniektu dla uszczelnienia spękanej stropowej półki ochronnej. Wdarciu to doprowadziło do zatopienia kopalni, zapadlisk na powierzchni i zniszczenia lub poważnego uszkodzenia 40 budynków. Bezpośrednim powodem powstania zapadlisk były głównie procesy subrozji



Rys. 19. Model 3D+t górotworu w Wapnie z lokalizacją maksymalnych odkształceń rozciągających w półce stropowej, po 50 latach $\text{Max}(\epsilon_x) = +4,64\%$

Fig. 19. 3D+t model of rock mass in Wapno with maximum tensile deformations in roof shelf, after 50 years $\text{Max}(\epsilon_x) = +4,64\%$



Rys. 20. Model 2D+t górotworu z polem 2 kopalni Kłodawa z rozwojem w czasie naprężeń rozciągających dla dwóch szerokości pola [23]

Fig. 20. 2D+t rock mass with field no. 2 of “Kłodawa” mine along with development of tensile stresses in time for two field breadths [23]

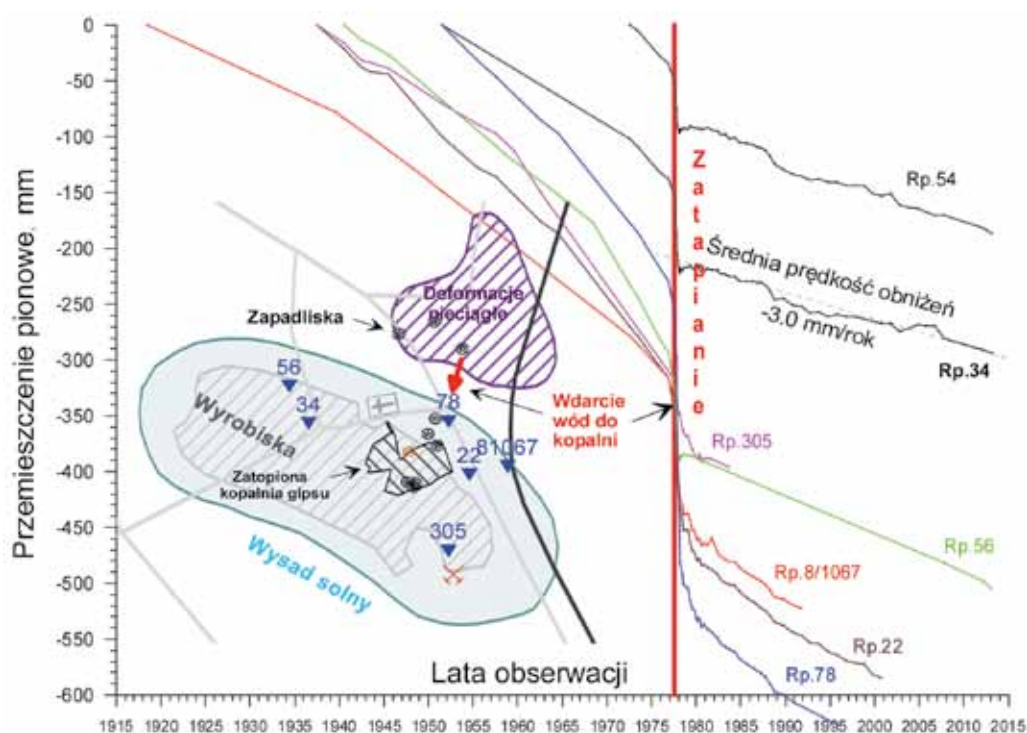
oraz sufozji i upłynnienia spowodowane przepływem wody i wynoszeniem uwodnionych utworów do wyrobisk [25]. Skutkiem tych procesów jest utrzymywanie się nadal strefy zagrożenia terenów w Wapnie, mimo obserwowanego ogólnego spadku prędkości obniżenia terenu (rys. 21) [Maj w 35].

Warunkiem powstania zawału jest obwał skał nad wyrobiskiem o znacznej powierzchni stropu i objętości umożliwiającej osiągnięcie przez strefę obwałów granicy utworów podpowierzchniowych o małej wytrzymałości [Kortas w 35]. Przykładem takiego procesu był obwał w komorze Błagaj oraz zawał komory Schmidt w kopalni Wieliczka w 1960 r. Po tych wydarzeniach ponownie podjęto wypełnianie piaskiem „na sucho” niektórych komór na górnych poziomach kopalni.

W otworowych kopalniach soli zagrożenia dla terenów górniczych wynikają z podobnych przyczyn. Obecnie podstawowym wymogiem prowadzenia eksploatacji otworowej jest ochrona stropu przez wprowadzenie pod strop płynów

izolacyjnych. W początkowym okresie stosowania tej technologii prowadzono ługowanie bez ochrony stropu. Skutkiem podawania wody pod strop i odbierania solanki nad spągciem był rozwój niekontrolowanych rozległych rozługowań stropowych, które doprowadzały do powstawania zapadlisk w Baryczy, najpierw na polu Centralnym, potem Słonecznym i na Pagorach, oraz w Łęzkowicach (rys. 22) [14]. Bezpośrednią przyczyną zapadlisk było zawsze osiągnięcie przez strefę rozługowań i obwałów utworów czwartorzędowych o małej zwięzłości i podatnych na namakanie. Łączna objętość zapadlisk w Łęzkowicach przekraczała 0,5 mln m³.

Po skonstruowaniu prototypu echosondy przez IPPT PAN zespół B. Rałowicza z OBR Chemkop w połowie lat 70. XX w. rozpoczął pomiary geometrii kawern metodą ultradźwiękową, najpierw w Łęzkowicach, potem w Górze, Mogilnie i w Baryczy. Rozpoznanie rozwoju kawern, chociaż niepełne stało się podstawowym warunkiem kontrolowanego ługowania



Rys. 21. Obniżenia terenów w Wapnie przed i po wdarcu wód do kopalni [Maj w 35]

Fig. 21. Ground subsidence in Wapno before and after water inrush [May in 35]



Rys. 22. Zapadlisko nad kawerną solną w Łęzkowicach, XI. 2001 r.

Fig. 22. Hollow above the salt cavity in Łęzkowice, November 2001

w kopalniach otworowych. Okazało się wtedy, że zapewnienie izolacji stropu nie eliminuje nieregularności rozługowań, wynikających z niejednorodności złoża. W strefach, gdzie występują warstwy chlorkowych soli potasu i magnezu lub czyste sole wielko-kryształowe wzrasta znacznie szybkość rozpuszczania. Skutkiem powstawanie w tych miejscach nadmiernych rozługowań jest kierunkowe poszerzanie kawern, szczególnie niekorzystne przy brzegu wysadu i w półce stropowej. Rozługowanie filarów wewnątrz pola eksploatacyjnego może spowodować połączenia między kawernami, a rozługowanie filarów brzeżnych rozszczelnienie kawern. Zapobiega się temu poprzez pozostawienie calizn ochronnych przy granicach złoża. Warunki niebezpieczne tworzą się jed-

nak wtedy, gdy granice wysadu solnego nie są dostatecznie rozpoznane. Obecnie sprawdzać to można radarem otworowym. Pomiary te prowadzi się kopalni Mogilno i Góra [41].

Skutkiem rozszczelnienia może być spadek podparcia hydraulicznego kawern, powodujący wzrost konwergencji i nadmierne odkształcenia w stropie i w filarach oraz lokalne obwały, obserwowane podnoszeniem się spągów kawern. Także wzrost ciśnienia mediów płynnych, magazynowanych w solnych kawernach, przekraczający ciśnienie litostatyczne skał w stropie kawern, prowadzić może do zeszcelinowania cementacji przy buciu rur wiertniczych. Powodować to może niekontrolowany wypływ do górotworu mediów wypełniających kawernę i zanieczyszczenie wód podziemnych, a także

uniemożliwić dalszą eksploatację. Rozszczelnienie kawerny wypełnionej gazem prowadzić może do wdarcia się wód do kawerny i wypełnienie jej wodą. Zapobiega się temu poprzez cementację buta rur w skałach o odpowiedniej wytrzymałości i nieprzekraczanie ciśnienia szczelinującego, a pośrednio poprzez stały monitoring ciśnień i przepływów oraz odpowiednie sterowanie położeniem rur [28]. Zapewnienie izolacji otoczenia między poszczególnymi komorami magazynowymi polega na zwiększeniu wymiarów filarów między kawernami nawet do 200 m. W kawernowym magazynie gazu w Kosakowie awaryjnemu wypływowi gazu zapobiega się dodatkowo przez zakładanie w rurach śluzy, automatycznie zamykającej się w przypadku niekontrolowanego przepływu gazu.

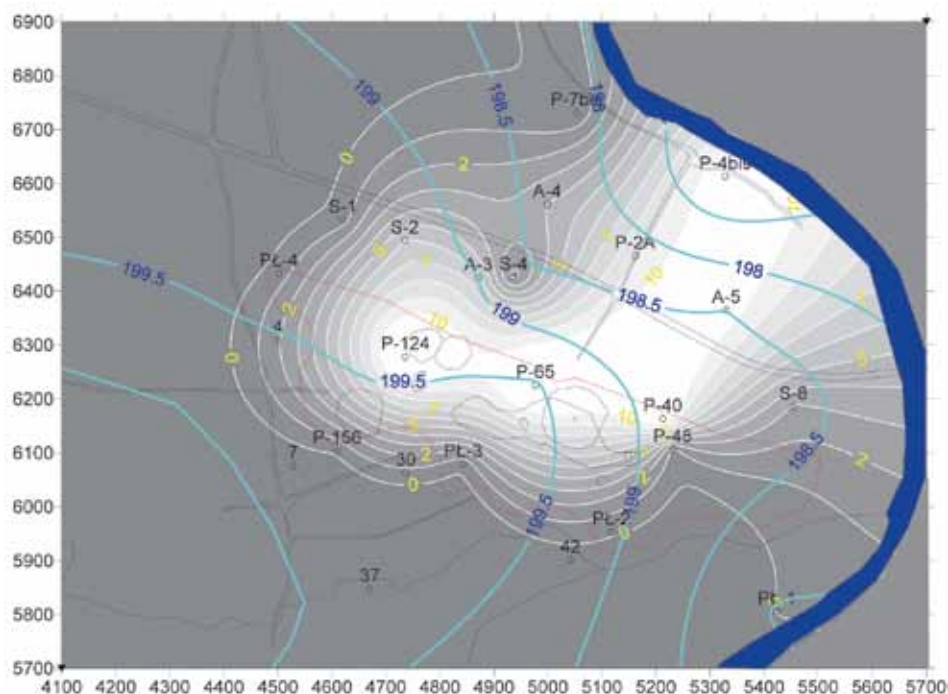
Niekontrolowane czerpanie solanek z zatopionych kopalń soli czy z rozługowań w otworowych kopalniach tworzy zawsze poważne zagrożenie dla terenów górniczych [2, 13]. Cechą takiej eksploatacji jest nieokreślone miejsce dopływu wód i dróg ich przepływu, a w konsekwencji strefy ługowania soli. Jeżeli dopływająca woda pochodzi z horyzontów podpowierzchniowych, to intensywnemu ługowaniu ulegają utwory w górnej strefie złoża, czyli blisko powierzchni terenu. Dla zapobiegania skutkom zapadlisk i rozługowań w Łęzkowicach prowadzone było wypełnianie kawern piaskiem. Do kawern wprowadzono łącznie 1,2 mln m³.

Procesowi zapadania kawern ługowniczych towarzyszy na ogół szybki wypływ nasyconej solanki oraz jej wprowadzenie do poziomu wód czwartorzędowych i dalej do cieków wodnych. W Łęzkowicach solanka przez szczeliny i rozługowania wyciskana była do górotworu i spływała w kierunku lokalnych zlewni (rys. 23). Szacuje się, że w kopalni „Łęzkowice” do wód powierzchniowych wprowadzonych zostało 0,95 mln Mg NaCl [14]. Obserwacje zasolenia cieków wodnych po powstaniu zapadliska Pagory w Baryczy w 1974 r. i po 1980 r. w Łęzkowicach pokazały, że tylko okresowo przekraczało ono

wartości dopuszczalne. Obecnie monitoring chemizmu wód prowadzony jest nad wszystkimi kopalniami podziemnymi i otworowymi, dodatkowo prowadzone są także okresowe badania stanu gleb i powietrza w otoczeniu podziemnych magazynów węglowodorów w Górze, Mogilnie i Kosakowie. Po zakończeniu eksploatacji w Łęzkowicach i w Baryczy, chemizm wód jest nadal kontrolowany.

Poważne konsekwencje dla powierzchni tworzą zawsze skutki długotrwałych i dynamicznych przepływów wód w warstwach podpowierzchniowych. Wody wdzierające się do poprzeczni Mina w kopalni „Wieliczka” po 1992 r. wyniosły z górotworu ponad 60 tys. Mg luźnych utworów. Objętość niecki związanej z sufozją i upłynnieniem indukowanymi wdarciem wód do kopalni w Wapnie osiągnęła wartość 310 tys. m³. W Łęzkowicach zapadlisko, które w 2001 r. pojawiło się w odległości kilkudziesięciu metrów od domów mieszkalnych, miało objętość 90 tys. m³, początkową głębokość 90 m i średnicę 60 m rosnącą w ciągu kilkunastu dni do 90 m. Objętość największego zapadliska w Łęzkowicach osiągnęła 180 tys. m³.

Przyczyną występowania deformacji nieciągłych jest także intensywny drenaż wód czwartorzędowych. W latach 80. XX w. pompowano zasolone wody czwartorzędowe i przygotowywano się do założenia bariery dla ochrony rzeki Raby w Łęzkowicach przed sływem zasolonych wód z zapadlisk. Wzrost osiadań i pojawienie się deformacji nieciągłych powstrzymało te prace. W Wapnie po zatopieniu kopalni wieloletni drenaż wód umożliwił miał obniżenie poziomu wód w czapie wysadu dla podjęcia eksploatacji gipsu. Obecnie proponuje się tam ryzykowny drenaż, dla ograniczenia dopływu wód czwartorzędowych do czapy wysadu. Perforacje i uruchomienie przepływów w pobliżu utworów, które wcześniej doznały naruszenia struktury w wyniku znacznych deformacji nieciągłych, należy uznać za potencjalnie niebezpieczne dla stabilności terenów.



Rys. 23. Tereny nad kopalnią Łęzkowice: kontury zapadlisk, piezometry, izoliny zwierciadła wód czwartorzędowych (niebieskie) i zawartości NaCl w wodach [g/dm³], rzeka Raba

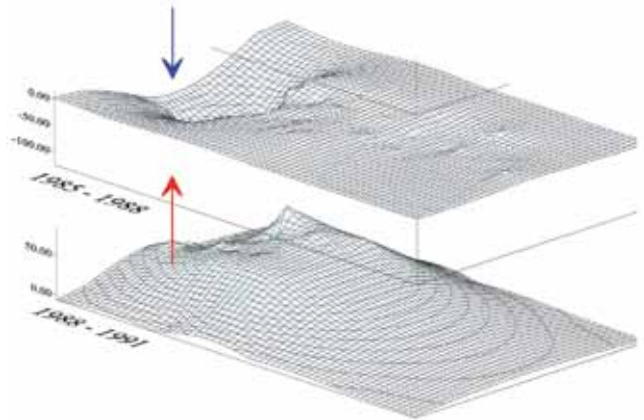
Fig. 23. Terrains above “Łęzkowice” mine: contours of hollows, piezometer, isolines of quaternary waters level (blue) and the content of NaCl in waters [g/dm³], Raba river

6. Problemy likwidacji kopalń soli i ich wpływ na tereny pogórnice

Po zakończeniu działalności górniczej przestaje działać przedsiębiorstwo górnicze i zmienia się porządek prawny, natomiast nie zanika oddziaływanie wyrobisk na górotwór i powierzchnię terenu. Wpływy kopalni na tereny pogórnice zależą wtedy od sposobu likwidacji wyrobisk. Korzystne dla środowiska jest takie prowadzenie eksploatacji, aby doprowadzić do jak największego zmniejszenia końcowej objętości wyrobisk poprzez ich wypełnianie solanką, materiałem podszkawkowym lub odpadami [28]. Technologia składowania odpadów zagwarantować jednak powinna zagospodarowanie wypieranej solanki i wyeliminowanie przedostawania się szkodliwych substancji do wód podziemnych.

Ze względu na zagrożenie wodne kopalni Solno i potencjalne skutki wdarcia wody do kopalni dla miasta Inowrocław w latach 1986 ÷ 1994 przeprowadzono jej kontrolowane zatopienie. Dla uniknięcia nadmiernych odługowań filarów, słabo nasycona solanka, zawierająca ługi odpadowe z huty szkła Irena, kierowana była najpierw do komór na najniższych poziomach i po wstępnym dosyceniu wypełniała sukcesywnie wyższe poziomy. Proces zatopienia zilustrowano podnoszeniem lustra wody w szybie (rys. 24 lewy). Po zatopieniu najwyższego poziomu w 1992 r. przeprowadzono likwidację szybów (rys. 24 prawy).

Podczas zatapiania kopalni Solno prowadzono pomiary przemieszczeń pionowych w kopalni i na powierzchni terenu. Na najwyższym 1. poziomie kopalni przed zatopieniem, obniżenia w latach 1976 – 1986 osiągnęły prędkość -35 mm/rok. W czasie zatopiania, w latach 1988 ÷ 1991 poziom ten podniósł się do $+81$ mm (rys. 25). Na powierzchni terenu w strefie poprzednio maksymalnych obniżień powierzchni terenu, w latach 1992 ÷ 1996 zaobserwowano wypiętrzanie dochodzące do $+6$ mm. Ruch ten, podobnie jak po zatopieniu kopalni w Wapnie w latach 1979 ÷ 1981, był skutkiem podparcia ścian komór hydrostatycznym ciśnieniem solanki wypełniającej kopalnię. Dalsze wielkoobszarowe obserwacje przemieszczeń na terenach pogórnicych w Inowrocławiu nie

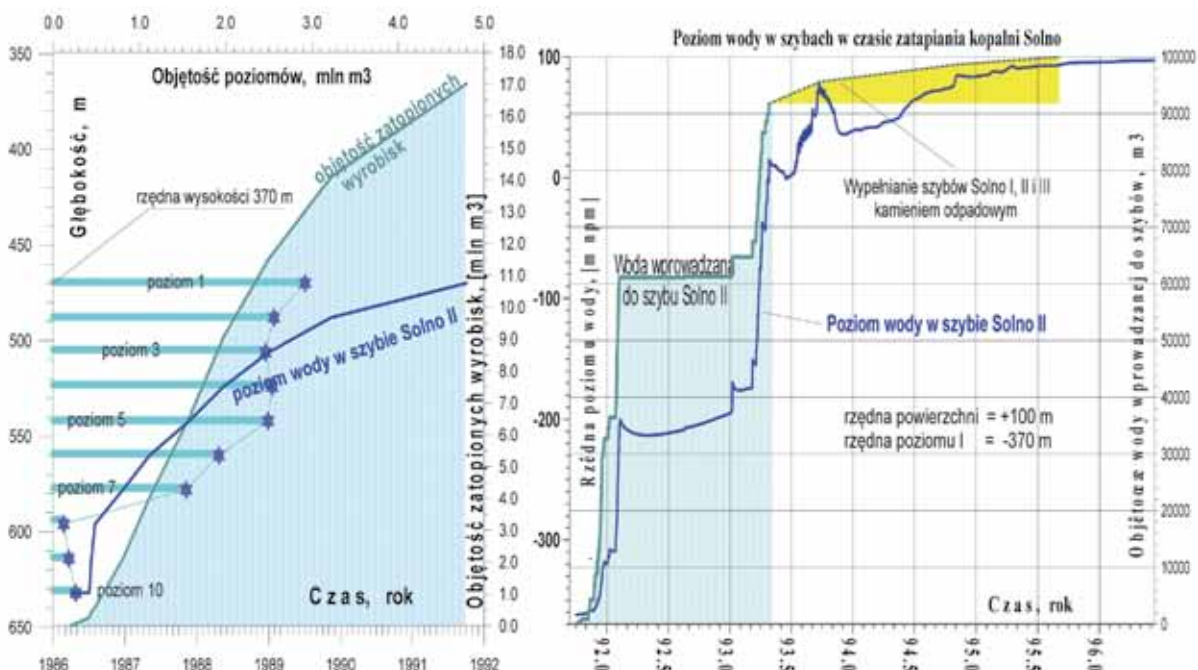


Rys. 25. Podnoszenie się 1 poziomu kopalni „Solno” w trakcie jej zatapiania [12]

Fig. 25. Rise of the 1st level of “Solno” mine during inundation [12]

były prowadzone, zatem stan powierzchni od 20 lat nie jest kontrolowany.

Zaciskanie wyrobisk w zlikwidowanych kopalniach zależy od ciśnienia hydraulicznego i gęstości medium wypełniającego wyrobiska. Prędkość konwergencji wypełnionych wyrobisk zmniejsza się ze wzrostem stężenia solanki i wysokością strefy wypełnienia wyrobisk. W warunkach miocennskich złóż soli, w obszarze odsłonięcia przez wyrobiska skał ilastych, obecność solanek prowadzi do namakania ilów i wzrostu ich podatności na pelzanie, a w konsekwencji do możliwej degradacji calizn. Dlatego też w Wieliczce w XIX i XX wieku podszadzano komory na „sucho”, sprowadzając piasek z otwartej dla tego celu piaskowni Psia Górka w Wieliczce. W ramach prac zabezpieczających pod strefą ochrony konserwatorskiej w kopalni Wieliczka opróżniane były nawet ługownie, a w miejsce solanek wprowadzano piasek. Wypełnianie dolnych poziomów solanką z piaskiem czy odpadowym urobkiem w kopalni „Wieliczka” i „Bochnia” jest obecnie jedynym



Rys. 24. Poziom wody w szybie podczas zatapiania kopalni Solno w Inowrocławiu

Fig. 24. Water level in shaft during inundation of Solno mine in Inowrocław

możliwym ze względów ekonomicznych sposobem likwidacji pustek. Skutki stosowania tej technologii powinny być jednak przedmiotem obserwacji i odpowiedniej analizy ich wyników.

Po likwidacji kopalni podziemnej przez zatopienie tworzyć się będzie nadal, ale znacznie wolniej niekiedy obniżenia na terenach pogórnich. Spowodowane jest to spadkiem naprężeń efektywnych w otoczeniu wyrobisk w wyniku oddziaływania rosnącego z głębokością ciśnienia solanki wypełniającej kawerny. Obserwacje w Wapnie po katastrofalnym zatopieniu kopalni pokazują, że obniżenia nad wyrobiskami dochodzą do -4 mm/rok, ale w strefie największych zapadlisk, które powstały w 1977 i 1978 r. na drodze przepływu wód do kopalni, prędkość obniżenia tylko nieznacznie zmniejszyła się w porównaniu z obniżeniami w okresie przed katastrofą (rys. 21). W Wieliczce nawet po 20 latach ujawniały się jeszcze skutki zmian warunków hydrogeologicznych i procesów sfozji na drogach przepływu wód [31]. Z tych względów obserwacje terenu nadal były prowadzone.

W wypełnionej solanką kopalni podziemnej czy kopalni otworowej postępować będzie rozpuszczenie soli potasowych i magnezowych, opadanie tych roztworów, aż do wylugowania tych utworów. Jednocześnie powstałe w wyniku rozługowania przestrzenie ulegać będą zaciskaniu. Proces ten powinien być kontrolowany przez pomiar stężenia jonów K i Mg w solance. Sposób kontrolowanej likwidacji kopalni powinien umożliwić te obserwacje po zatopieniu kopalni.

W nieszczelnym górotworze, jak na przykład w Wapnie, konwergencja powoduje niekontrolowany wypływ solanki z zatopionych wyrobisk do górotworu. Powiększać się wtedy będzie naturalna aureola solanek w wodach podziemnych. Wpływać to może niekorzystnie tylko na blisko położone ujęcia wody pitnej.

Po szczelnym zamknięciu otworów wiertniczych, ciśnienie solanki wzrastać będzie do wartości ciśnienia litostatycznego skał na głębokości spągu kawerny. Ze względu na różnice gęstości skał i solanki takie zamknięcie może być skuteczne tylko w kawernach o małej wysokości [28]. Zamykanie otworów w Górze czy Mogilnie spowodowałoby wzrost ciśnienia w kawernach, rozszczelnienie cementacji buta rur i wypływ solanki w ilości w przybliżeniu odpowiadającej przyrostowi konwergencji objętościowej. Dlatego po zakończeniu eksploatacji w tych kopalniach wypełnione solanką kawerny nie mogą być szczelnie zamknięte, a wypływ solanki będzie trzeba stale ujmować i odprowadzać z pola pogórnich.

Działalność górnictwa w końcowej fazie eksploatacji w Baryczy prowadzono w części północno-wschodniej i południowo-zachodniej i zakończono ją w 1997 r. Przeprowadzona likwidacja instalacji otworowej kopalni polegała na likwidacji powierzchniowych rurociągów, wyciąganiu rur lub zmykaniu rurociągów. Część terenów górnich w Baryczy, na których w latach 70. XX w. zakończona została eksploatacja otworowa, przekazano miastu Kraków na składowisko odpadów komunalnych. Pod składowiskiem nadal postępuje jednak proces osiadania terenu oraz wynoszona jest solanka z zaciskających się kawern. Ze względu na obecność składowiska kontrolę oddziaływania na tereny pogórnice sprawowaną przez Kopalnię Wieliczka ograniczono do obrzeży zlikwidowanej kopalni oraz pól Soboniowice, Pagory i Tomana. W tych obszarach maksymalne przyrosty obniżenia terenu w okresie ostatnich lat osiągają obecnie -18 mm/rok.

Tereny nad nieczynną kopalnią w Łęzkowicach nadal są nadzorowane przez Kopalnię Bochnia. Ponieważ sposób likwidacji instalacji otworowej był podobny jak w Baryczy solanki są wyciskane do wód czwartorzędowych. Pomiar hydrogeologiczne i geodezyjne wykonywane są systematycznie. Prędkość obniżenia poszczególnych punktów obserwacyjnych wykazuje znaczną zmienność. Maksymalne przyrosty obniżenia

także są zróżnicowane, w okresie 1996–2013 r. wyniosły około ± 19 mm/rok, ale występowały także obniżenia przekraczające w ciągu roku -50 mm. Na zasolonej powierzchni terenu pojawia się specyficzna dla tych warunków flora i fauna, która ze względu na unikalność tego środowiska powinna być moim zdaniem chroniona. Z powodu niestabilności górotworu i wyjątkowych walorów przyrodniczych tereny pogórnice w Łęzkowicach nie powinny podlegać tradycyjnej rekultywacji.

Zakończenie działalności górnictwa w kopalniach otworowych nie powoduje zmian w narastaniu obniżenia na powierzchni. Maksymalne prędkości obniżenia i odkształceń pojawiać się będą w chwili zakończenia eksploatacji. Także zakończenie eksploatacji podziemnej i zatopienie wyrobisk w wysadach solnych nie zatrzyma postępującego rozpuszczania w solance soli potasowo-magnezowych, powiększając przestrzenie rozługowań. Odczuwane przez użytkowników terenów pogórnich zagrożenie może ulec zwiększeniu ze względu na brak nadzoru górnictwa, systematycznej obserwacji i bieżącej kompetentnej oceny kształtowania się wpływów wyrobisk, co należało poprzednio do obowiązków zakładu górnictwa.

Innym, ale niegórnym problemem są szkody pojawiające się na terenach pogórnich z powodów niezwiązanych z górnictwem. Uciążliwość powodują na przykład występujące licznie na przedpolu Karpat osuwiska, w tym także w strefie wpływów na powierzchnię kopalni soli w Wieliczce i Bochni. Zagrożenie tworzy obecność naturalnych pustek podpowierzchniowych, na przykład w czapach wysadów solnych. W Inowrocławiu w XIX w. zapadliska powstawały nawet przed rozpoczęciem działalności górnictwa [4]. Zdarzeń takich nie można wykluczyć w przyszłości. Z tego względu wprowadzono ograniczenia dla warunków zabudowy w Inowrocławiu [2], które po zniesieniu nadzoru górnictwa, nie są stosowane.

Dla prawidłowej interpretacji wyników obserwacji wpływów wyrobisk istotne jest wyodrębnienie terenów podatnych na niegórnice oddziaływania. Dotyczy to stref oddziaływań geodynamicznych, czynnych osuwisk czy terenów ulegających wpływom czynników hydrogeologicznych. Przykłady aktywnych oddziaływań geomorfologicznych zostały zidentyfikowane na terenach nad kopalniami w Bochni i Wieliczce [16].

Zagospodarowanie terenów pogórnich kopalni otworowych i podziemnych uwzględnić powinno fakt długotrwałego oddziaływania wyrobisk na środowisko górotworu i powierzchnię terenu po zamknięciu zakładu górnictwa. Potrzebne jest formalne sklasyfikowanie terenów pogórnich według warunków górnich i środowiskowych oraz określenie odpowiednich rygorów dalszego kontrolowania terenów i ich zagospodarowania, a także ustanowienie osób prawnych nadzorujących profesjonalnie te czynności.

7. Wnioski

1. Specyfika oddziaływań na górotwór kopalni soli wynika z właściwości fizycznych i chemicznych skał solnych oraz dostosowanych do tego sposobów wydobywania kopaliny. Mimo różnorodności warunków geologicznych i górnich w pokładowych i wysadach złóż soli obniżenia powierzchni terenu spowodowane oddziaływaniem wyrobisk nie przekraczają kilkudziesięciu milimetrów rocznie. Przyczyną tego jest komorowo-filarowa struktura kopalni soli z wykorzystaniem w niej około 25% złoża oraz pozostawianie calizn chroniących wyrobiska przed wodami.
2. Cechą charakteryzującą warunki geomechaniczne w kopalniach soli jest pełzanie skał solnych, przejawiające się długotrwałym procesem zaciskania wyrobisk. Pokazano,

- że konwergencje i obniżenia powierzchni określają funkcje potęgowe lub wykładnicze czasu, ujawniające długookresowy trend ruchu górotworu. Wyróżnić można trzy fazy zaciskania wyrobisk: 1. powstawania wyrobiska, 2. zaciskania quasi-ciągłego i 3. zaciskania obwałów i rumoszu skalnego. Podobne fazy wskazać można także w procesie zaciskania pól górniczych czy kopalni.
3. Rozkład i niepełny kształt niecek obniżeń oraz zasięg obniżeń powierzchni terenu jest skutkiem warunków geologiczno-górnictwowych, a w szczególności formy struktury kopalni. Wyróżnikiem trzech typów wykształcenia się niecek obniżeń jest ich: centryczność, odchylenie centrum i dwucentryczność w nieckach osobliwych z kierunkową zmiennością zasięgu wpływów. Obserwacje wskazują, że maksymalny zasięg wpływów zaciskania wyrobisk jest bliski dwukrotnej głębokości wyrobisk.
 4. Kategoryzacja terenów górniczych z 1956 r. skierowana na warunki geologiczno-górnictwowe pokładowych kopalń węgla i powiązana z nią profilaktyka budowlana nie jest dostosowana do specyfiki oddziaływań górnictwa solnego. Charakteryzuje je małe, ale bardzo długotrwałe odkształcanie się otoczenia wyrobisk i powierzchni terenu. Potrzebne jest sformułowanie nowej kategoryzacji terenu górniczego, obejmującej bardzo wolne i bardzo szybkie oddziaływania wyrobisk oraz dostosowanie do tego profilaktyki budowlanej i zasad oceny szkodliwości wpływów górniczych.
 5. Skutki wdarcia wody do podziemnych kopalń soli, niekontrolowane i nadmierne rozługowania w kopalniach otworowych, niekontrolowane czerpanie solanek i intensywny pobór wody w rejonie zaistniałych deformacji nieciągłych oraz pozostawienie bez zabezpieczeń płytkich i rozległych wyrobisk powodowały aktywizację lub powstawanie deformacji nieciągłych i zapadlisk. Potencjalne zagrożenie powszechne tworzą znaczne objętości niewypelnionych wyrobisk podziemnych kopalń soli, których możliwe niekontrolowane zatopienie doprowadzić może do katastrofy na terenach górniczych. Obszary objęte takim zagrożeniem powinny być sklasyfikowane i ujęte w kategoryzacji terenu górniczego.
 6. Po zakończeniu działalności górniczej w kopalniach otworowych narastać będą konwergencje, wpływy solanki z kawern i długotrwałe obniżenia terenu. Także zatopione podziemne kopalnie soli, na przykład w Wąpnie, powodować mogą dalsze zagrożenia. Dlatego potrzebne jest ustanowienie dla terenów pogórnictwowych odpowiedniej kodyfikacji prawnej, z wymogiem nadzoru, klasyfikacji zagrożeń środowiska, zakresu obserwacji i okresowej oceny zagrożeń. Specyfika tych terenów powinna być uwzględniana w planowaniu przestrzennym.
6. *Garlicki A, Wilk Z.*: Geologiczne i hydrogeologiczne tło awarii na poziomie IV kopalni soli Wieliczka, *Przeгляд Geologiczny* nr. 3, 1993
 7. *Hwałek A.*: Górnictwo soli kamiennych i potasowych, Wydawnictwo Śląsk, 1971
 8. *Knothe S.*: Prognozowanie wpływów eksploatacji górniczej, Wyd. Śląsk, 1984
 9. *Kortas G.*: Przemieszczenia i odkształcenia w wielopoziomowych komorowo - filarowych kopalniach soli, *Zeszyty Naukowe AGH, Nr 1207, Geodezja*, z. 101, Wyd. AGH, Kraków, monografia, 1989
 11. *Kortas G.*: Wpływy eksploatacji górniczej w Inowrocławiu na powierzchnię, *Przeгляд Górniczy*, nr 4, 1997
 12. *Kortas G.*: Zachowanie się górotworu w kopalni soli Solno, *Przeгляд Górniczy*, nr 6, 1997
 13. *Kortas G.*: Zagrożenie powierzchni terenu wywołane konwergencyjnym zaciskaniem kawern nieczynnej otworowej kopalni soli w Łęczkowicach, *Przeгляд Górniczy*, nr 3, 2003
 14. *Kortas G.* 2003b, Zagrożenie zawalowe i mechanizm powstawania zapadlisk w otworowej kopalni soli, *Przeгляд Górniczy* nr 1, 2003,
 15. *Kortas G. red.*: Ruch górotworu i powierzchni w otoczeniu zabytkowych kopalń soli, monografia, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków, 2004
 16. *Kortas G.*: Przemieszczenia nad historyczną kopalnią w Wieliczce, *Przeгляд Górniczy* nr 3, 2007
 17. *Kortas G. red.*: Ruch górotworu w rejonie wysadów solnych, *Kortas G. s. 119-155, 160-215, 225-233, 235-245*, Wyd. IGSMiE PAN, 2008
 18. *Kortas G.*: Singularities of the Rock Mass Movement during the Mining of Salt Domes, *Solution Mining Research Institute, Spring 2009 Tech. Conf. Kraków*, 2009
 19. *Kortas G.*: Szyb z obudową w górotworze solnym, wstępne badania modelowe, *Górnictwo i Geoinżynieria Kwartalnik Akademii Górniczo Hutniczej, Kraków z. 2*, 2010
 20. *Kortas G.*: On the convergence of workings and the purpose of workings observations in salt mines, *Geology, Geophysics & Environment Vol. 38/1 – Przeгляд Solny*, 2012
 21. *Kortas G.*: Zagrożenie wodne w polskich podziemnych kopalniach soli, *Przeгляд Górniczy*, 5, 2013.
 22. *Kortas G., Maj A.*: Evaluation of stresses around an underground reservoir of liquid fuels in unrecognized mining and geological conditions, *Eurock, Czechy 2005*
 23. *Kortas G., Maj A.*: Warunki geomechaniczne w caliznach chroniących przed wodami, na przykładzie kopalni soli Kłodawa, *Przeгляд Górniczy* nr 12, 2012
 24. *Kortas G, Maj A, Drogowski J.*: Land Subsidence Caused by Solution Mining in the Mogilno Salt Dome, *Geology, Geophysics & Environment Vol. 39 No.3 – Przeгляд Solny* 2013
 25. *Kortas G., Wilk J., Jasiński Z.*: Surface protection problem in condition of water hazard in diapir salt mines, *Proceeding Symposium of International Mine Water Association "Mine Water"*, Granada, 1985
 26. *Kortas G., Wodyński A.*: Szkody górnicze w warunkach powolnej deformacji górotworu w Bochni, *Przeгляд Górniczy*, t. 47, nr 9, 1991
 27. *Kwiatk J. red.*: Ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych, *WGIG Katowice* 1998
 28. *Kunzman A.*: *Przeгляд problemów związanych z końcową fazą eksploatacji kopalń soli, Materiały z II Spotkania PSGS, Wiktorowo*, 1998
 29. *Kunzman A., Lepiarz J., Poborska-Młynarska K, Urbańczyk K.*: Wstępne koncepcje likwidacji Kopalni Soli Kłodaw, *Gospodarka Surowcami Mineralnymi, Przeгляд Solny* 2007 t. 23 z. spec. 1, 2007
 30. *Kunzman A. Poborska-Młynarska K. Urbańczyk K.*: Zarys otworowego ługownictwa solnego, *Uczelniane Wyd. Naukowo-Dydaktyczne, AGH Kraków*, 2002
 31. *Maj A.*: Convergence of gallery workings in underground salt mines, *Archives of Mining Science* 2012/14, monograph, 2012
 32. *Maj A., Kortas G., Drogowski J.*: Ground uplift after the closure of water leak on Mina drift of the Wieliczka Salt Mine, *Geology, Geophysics & Environment Vol. 38 No.1*, 2012
 33. *Minkley W., Menzel W.*: Local instability and system instability of room and pillar in potash mines, *The Mechanical Behavior of Salt, Trans Tech Publications, Claustal-Zallarfeld*, 1993

Literatura

1. *Beyschlag F.*: Das Salzvorkommen von Hohensalz Jahrbuch der Königl. Preuss, Geologischen Landesanstalt, Jg 24:1913 Tl. 2 Berlin, s 225÷444, 1913
2. *Budryk W.*: Zapadliska na terenie miasta Inowrocław. *Przeгляд Górniczo-Hutniczy*, T.25 No 8 s. 431÷444, 1933
3. *Budryk W., Knothe S.*: Zasady klasyfikacji terenów Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego ze względu na możliwość ich zabudowy, PAN, Komitet dla Spraw GOP, Biuletyn nr. 4 W-wa, 1956
4. *Ertel.* Salinenbetrieb und Salzbergbau in der Orivunz Posen, *Festschrift zum XII Allg. Deutschen Bergmenstag in Breslau*, s. 275-316, 1907
5. *Flisiak D.*: Własności odkształceniowe soli kamiennnej w próbach reologicznych. *Geotechnika i Budownictwo Specjalne. Kraków, Wyd. KGBiG AGH*, s. 165÷177, 2002

34. *Popiołek E.*: Ochrona terenów górniczych, Wydawnictwa AGH, 2009
35. *Rasala red.*: Dokumentacja geologiczna określająca zagrożenia terenu pogórniczego kopalni soli Wapno w zakresie określenia jego przydatności do zagospodarowania i rewitalizacji, Hydro-Nafta, praca niepublikowana, Urząd Gminy Wapno, 2014
36. *Siembab J., Kortas G.*: Filary ochronna w górnictwie surowców chemicznych, Ochrona Terenów Górniczych, nr 57, KOPPSG WUG, Katowice, 1981
37. *Ślizowski J.*: Geomechaniczne podstawy projektowania komór magazynowych gazu ziemnego, Studia, Rozprawy, Monografie, No 137 Wyd. IGSMiE PAN, Kraków, 2006
38. *Ślizowski K., Kortas G.*: Zagrożenie powierzchni spowodowane eksploatacją wysadów solnych na przykładzie Kopalni Soli im. T. Kościuszki w Wapnie, Ochrona Terenów Górniczych, nr 51, 1980
39. *Ślizowski K., Saluga.*: Surowce mineralne Polski, Surowce chemiczne Sól kamienna, GSMiE Kraków, 1996
40. *Szewczyk J.*: Kopalnia Soli „Wieliczka” – 80 lat obserwacji deformacji pogórnicznych, Gospodarka Surowcami Mineralnymi t.24, z.32 – Przegląd Solny, 2008
41. *Tadych J., Drogowski J., Grzybowski Ł., Kleczar M., Enghardt J., Bornemann O.*: Optymalizacja procesu eksploatacji soli kamiennej w oparciu o geologiczną interpretację pomiarów georadarem złóż soli kamiennej, Materiały Konferencyjne XV Sympozjum Quo Vadis Sal, Świeradów Zdrój 62-65, 2010

Autor wyraża podziękowania Agnieszce Maj za cenne uwagi przy redakcji tekstu tej publikacji.