



## Sygnaly odkształcenia i pęknięcia skał solnych w badaniach laboratoryjnych i obserwacjach *in situ*

### Signals of salt rock strain and fracture in laboratory tests and *in situ* observations

Dr hab. inż. Grzegorz Kortas<sup>\*)</sup>

**Treść:** Praca przedstawia zjawisko odkształcania i pęknięcia skał solnych rozpoznane w laboratoryjnych testach wytrzymałości i pełzania oraz w obserwacjach przemieszczeń stropu komór, konwergencji wyrobisk i deformacji calizn w podziemnych polskich kopalniach soli. W teście doraźnego ściskania sygnały pęknięcia próbek skał powiązane są ze wzrostem odkształceń objętościowych i pojawiają się, gdy naprężenia różnicowe przekraczają długotrwałą wytrzymałość. W testach pełzania zaznacza się zmianą parametrów funkcji pełzania (5), rys. 4. Rozwój spękań w caliznach solnych *in situ* identyfikowany może być poprzez rejestrację emisji akustycznej, a istniejących szczelin poprzez określanie składowych płaskiego tensora odkształcenia (rys. 6). Przedstawiono i omówiono obserwacje pełzania skał solnych w stropach komór obserwowane czujnikami przemieszczeń (rys. 7 – 10), wskazując na przejawy pokonywania tarcia statycznego i dynamicznego w procesie długotrwałego ruchu przemieszczeń stropu wyrażanych funkcją potęgową czasu. Przedstawiono przejawy sezonowych zmian prędkości pełzania powiązanych ze zmianą wilgotności powietrza kopalnianego (rys. 11) oraz rejestracją obwałów skał stropowych (rys. 12). Wskazuje się, że obserwacje konwergencyjnego zaciskania wyrobisk tylko pośrednio służyć mogą sygnalizacji pęknięcia skał ze względu na trudność rozdzielenia ruchu spągowego od stropowego. Poprzez określanie konwergencji objętościowej obserwacje te rejestrują deformacje calizn w szerszym otoczeniu obserwowanych wyrobisk oraz ujawniają długookresowe trendy ruchu górotworu (rys. 14 i 15). Przeglądy wizualne calizn, pomiary przemieszczeń, konwergencji pustek, deformacji calizn, pomiary geofizyczne i obliczeniowa analiza geomechaniczna, każdy sam w sobie nie jest rozstrzygający dla określania zagrożenia i oceny stanu bezpieczeństwa geomechanicznego. Współzestniczenie tych działań i analiz jest właściwą praktyką. Wskazano na potrzebę identyfikowania sygnałów pęknięcia skał solnych dla oceny zagrożenia obwałem i nadmiernymi deformacjami. Przeprowadzona analiza i wynikające z niej wnioski są szczególnie istotne dla rozpoznania warunków bezpieczeństwa w zabytkowych kopalniach soli w Polsce, w których liczba turystów wzrosła w 2014 r. do 1.5 mln. osób.

**Abstract:** This paper presents the phenomenon of salt rock strain and fracture diagnosed in laboratory endurance and creep tests as well as through observations of chamber roof displacements, excavation convergence and deformation of virgin soils in the underground Polish salt mines. In a compression test the signals of rock sample fracture are connected with the rise in dilatational strain and occur when differential tensions have exceeded long-term strength. In creep tests the change in parameters of creep function is marked (5), fig. 4. The development of cracks in salt soils *in situ* may be identified by recording acoustic emission while the existing fissures – by determining the components of the flat deformation tensor (fig. 6). Observations of salt rocks creeping in chamber roofs by use of displacement sensors (fig. 7 – 10) were made, indicating the signals of overcoming static and dynamic friction in the process of long-lasting movement of the roof expressed in terms of power function of time. The signals of seasonal fluctuation in creeping velocity were presented which are connected with the change in humidity of mine air temperature (fig. 11) and recording of roof fall (fig. 12). It is indicated that observations of excavation convergence may be a symptom of rock fracture indirectly only, due to the difficulty of separating the floor movement from the roof movement. Through the determination of volumetric convergence, the observations register deformation of soils in the wider area of the monitored excavations and demonstrate longstanding trends of the rock mass movements (fig. 14 and 15). Inspections of undisturbed soils, measurements of movements, cavern convergence, undisturbed soils deformations, geophysical measurements and computational geomechanical analysis, are not conclusive for every single one to determine threats and the state of geomechanical safety. Coexistence of those actions and analyses is a proper practice. The need of identification of the signals of salt rock fracturing for the evaluation of roof fall hazard and excessive deformations was indicated. The analysis and conclusions are particularly important for the identification of safety conditions in the monumental Polish salt mines, with continuously growing number of visitors and tourists up to 1.5 mln in 2014.

#### Słowa kluczowe:

*pęknięcie skał, sól kamienna, wytrzymałość górotworu, kopalnie zabytkowe*

#### Key words:

*rock fracture, salt rock, rock mass strength, monumental salt mines*

<sup>\*)</sup> Instytut Mechaniki Górotworu PAN w Krakowie

## 1. Wprowadzenie

Mechanizm powstawania i rozwoju spękań skał jest jednym z podstawowych problemów badawczych w geomechanice [21, 28]. Spękania skał obserwuje się *in situ*, a w laboratoriach geomechanicznych bada się je w testach doraźnych i długotrwałych i przedstawia w [3, 5, 6]. Warunki występujące w górotworze solnym różnią się od laboratoryjnych złożonością litologiczną masywu skalnego, skalą wymiarów przestrzennych i czasu obciążeń, ale przyczyną spękań są zawsze nadmierne naprężenia i odkształcenia. W tej pracy przedstawiono sygnały pęknięcia skał, omawiając wyniki laboratoryjnych badań wytrzymałości i pełzania, ale przede wszystkim wieloletnich obserwacji przemieszczeń *in situ* w różnych warunkach górniczych kopalni soli.

Rozpoznanie procesu spękania skał ma ważne znaczenie praktyczne. Dotyczy sposobów urabiania i czerpania kopaliny, a także warunków bezpieczeństwa w wyrobiskach. Rozwój odkształceń spowodowanych pękaniem skał prowadzić może do znacznego obwałowania i powodować wypadki górnicze. Identyfikacja nadmiernych naprężeń, odkształceń i spękania skał służyć powinna ostrzeganiu o tym zagrożeniu. Jest to szczególnie ważne dla bezpieczeństwa turystów w zabytkowych kopalniach soli, bo dotyczy warunków, na które mogą być bezpośrednio narażeni ludzie. W Polsce liczba osób odwiedzających zabytkowe kopalnie soli stale rośnie i zbliża się obecnie do 1.5 mln w roku.

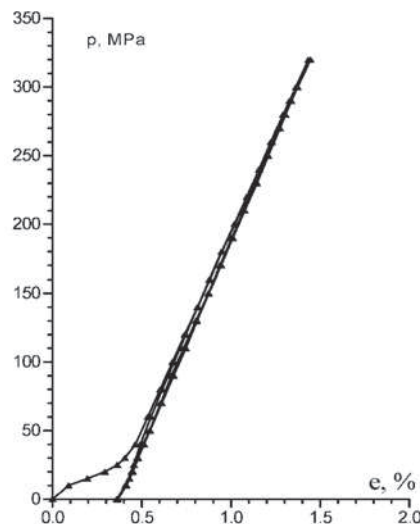
Praca zawiera przegląd wyników rozpoznawania pęknięcia skał solnych w świetle badań laboratoryjnych, geotechnicznych, obserwacji przemieszczeń stropu komór, deformacji calizn i konwergencji wyrobisk w podziemnych kopalniach soli. Celem pracy jest syntetyczne przedstawienie wyników charakteryzujących to zjawisko oraz określenie przydatności obserwacji *in situ* dla kontrolowania i opanowania wynikającego z tego zagrożenia.

## 2. Spękania i wytrzymałość soli kamiennej

Silami spajającymi atomy są oddziaływania elektrostatyczne, a kryształy – wiązania jonowe. W kryształach Na Cl wiązania jonowe polegają na tym, że elektron na zewnętrznej orbicie atomu sodu uzupełnia jego brak w atomie chloru. W procesie krystalizacji soli z roztworów macierzystych, wiążąc w ten sposób sąsiednie jony, powstają polikryształy, tworząc ziarnistą strukturę ewaporatu, zmieniającego się w trakcie wielowiekowej sedymentacji i obciążeń masowych w skałę.

Skały solne wykazują sprężystość i są w pewnych warunkach kruche, w innych lepkie. Gustkiewicz w [3] pokazał, że sól kamienna przy szybkich, kilkuminutowych zmianach ciśnienia zachowuje się jak ciało idealnie sprężyste (rys. 1) i ulegać wtedy może pękaniu kruchym, obserwowanym także *in situ*. Pod wpływem długotrwałych obciążeń sól kamienna wykazuje ciągliwość, co przejawia się pełzaniem i relaksacją naprężeń. Skutkiem takich właściwości, w górotworze solnym wykształca się unikalny, hydrostatyczny stan naprężeń litostatycznych.

Spękanie jest mechaniczną właściwością skał wynikającą z obecności syn- i post-genetycznych defektów krystalicznych i zakłóceń mikro i makrostruktury. W skałi wymiarów morfologia powierzchni pęknięć w skałach, ma charakter fraktalny, ujawniający cechę samopodobieństwa [2, 24]. Poślizgi, zatrzymanie i propagacja szczelin, otwieranie i rozwieranie pęknięć zależą od wartości naprężenia normalnego i stycznego do powierzchni nieciągłości. Lokalny wzrost różnic naprężeń głównych w tensorowym polu naprężenia prowadzi do powstawania i rozwoju pęknięć, na ogół z lo-



Rys. 1. Związek ciśnienia  $p \in [0, 350 \text{ MPa}]$  z odkształceniem objętościowym  $e \in [0, 1.5\%]$  w doraźnym teście ściskania soli kamiennej wg Gustkiewicza [3]

Fig. 1. Relationship between pressure  $p \in [0, 350 \text{ MPa}]$  and volumetric strain  $e \in [0, 1.5\%]$  in a temporary salt rock compression test, according to Gustkiewicz [3]

kalnym przyrostem objętości skały. Pojawia się wtedy emisja fal sprężystych, łączenie szczelin i tworzenie pustek między kryształami i ziarnami, co prowadzi do przekroczenia wytrzymałości mechanicznej.

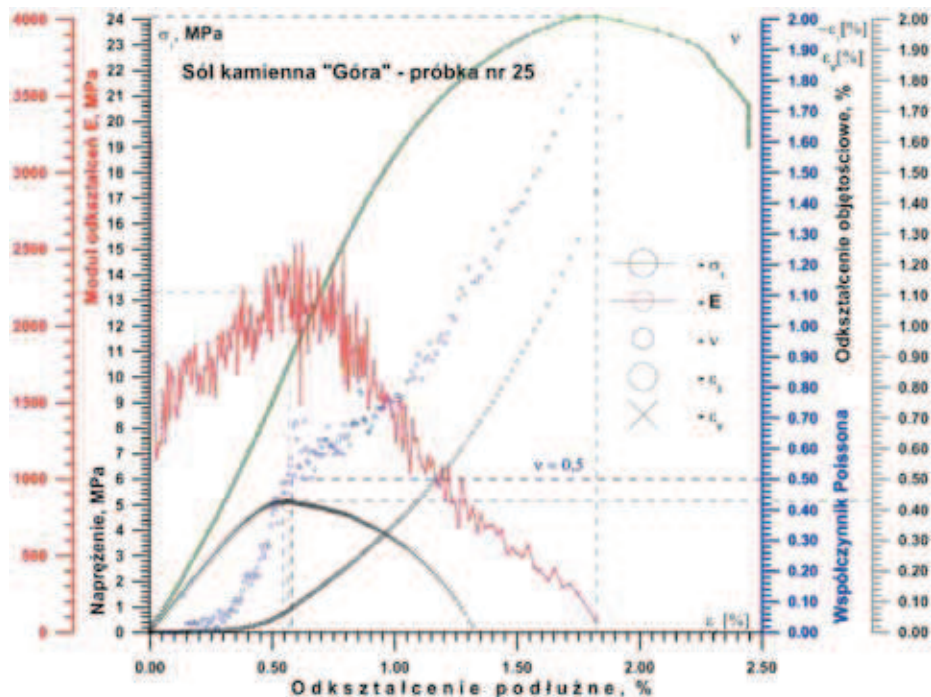
Morfologia spękań i wytrzymałość skał powiązana jest ze skalą wymiarów różnych czynników ją kształtujących [9]. W skałi wymiarów kryształów są to defekty sieciowe, w skałi ziaren – zaburzenia wykształcenia ich granic czy obecność inkluzji wypełnionych gazami lub cieczą, w skałi wieloziarnowej struktury – obecność wtrąceń ziaren różnych minerałów – w solach kamiennych przede wszystkim krzemionki, gipsu/anhydrytu i minerałów ilastych, w skałi przestrzeni górotworu – niejednorodność litologiczna, obecność przewarstwień skał różniących się odkształcalnością, fałdów czy przesunięć tektonicznych. Czynniki te powodują, że ze wzrostem wymiaru wytrzymałość skał wyraźnie zmniejsza się.

## 3. Wytrzymałość próbek soli w teście ściskania

Geomechaniczne badania laboratoryjne służą określeniu właściwości skał i ich klasyfikacji oraz opisaniu podstawowych i charakterystycznych zjawisk geomechanicznych. Zależność odkształceń sprężystych od naprężeń w próbkach skał określa się w doraźnych testach laboratoryjnych. Doraźne zmiany naprężeń występują *in situ* przy urabianiu skał i wstrząsach tektonicznych lub indukowanych robotami górniczymi. Niech ilustruje je tu wynik ściskania cylindrycznej próbki soli kamiennej o średnicy 5 cm i smukłości 2, przeprowadzony przez A. Nowakowskiego [3] w laboratorium IMG PAN\* na prasie sztywnej Instron (rys. 2).

Ze względu na rozwój spękań pod wpływem wzrostu naprężeń doraźnych wyróżnia się charakterystyczne fazy ściskania próbek skał [20, 28]. W pierwszej fazie następuje zamykanie mikroszczelin w kierunku 1 – normalnym do osi podłużnej. Moduł odkształceń  $E = \sigma_1 / \varepsilon_1$ , czyli stosunek naprężenia osiowego do odkształcenia osiowego, rośnie liniowo do wartości 1.1 GPa. Potęgowo wzrasta odkształcenie

\* Instytut Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk



Rys. 2. Wyniki testu jednoosiowego ściskania próbki soli kamiennej [3]  
Fig. 2. Results of the uniaxial compression test of a rock salt sample [3]

poprzeczne  $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$  i współczynnik  $\nu = \varepsilon_2 / \varepsilon_1$ , natomiast odkształcenie objętościowe  $\varepsilon_v \approx \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$  zmniejsza się w funkcji wydłużenia. Zależność między naprężeniem a odkształceniem poprzecznym jest nieliniowa. Na granicy pierwszej i drugiej fazy naprężenie osiowe osiąga 11 MPa, moduł odkształceń jest maksymalny  $E_{max} = 2.4$  GPa, współczynnik  $\nu$  dochodzi do 0.5, a odkształcenie objętościowe osiąga minimum równe  $^{min}\varepsilon_v = -0.42\%$ . Na granicy pierwszej i drugiej fazy oznaczane parametry są bliskie właściwościom niespękanej skały solnej.

W drugiej fazie moduł odkształceń  $E$  zmniejsza się, a maksymalne naprężenie osiowe osiąga 24 MPa. Odpowiada to granicy wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie  $R_c$ . W tej fazie pojawia się dylatacja [20], przejawiająca się powstawaniem i wzrostem mikrospęków rozdzielczych i pustych przestrzeni między kryształami i ziarnami. Skutkiem tego jest wzrost odkształcenia objętościowego,  $\varepsilon_v - ^{min}\varepsilon_v > 0$  i spadek gęstości skały z wyciskaniem płynów zawartych w inkluzjach. Spękania sygnalizuje emisja akustyczna. Naprężenia, inicjujące powstawanie spęków na granicy pierwszej i drugiej fazy, czyli na progu pojawiania się dylatacji, odpowiadają w przybliżeniu granicy *dlugotrwałej wytrzymałości* soli kamiennej Dreyer [5]. W przedstawionym teście i w innych badaniach Kłeczka i Flisiak [8] jest to wartość około  $\frac{1}{2} R_c$ .

Zachowanie próbki po przekroczeniu granicy wytrzymałości, w fazie trzeciej – pokrytycznej, zależy od energii nagromadzonej w próbce przed osiągnięciem granicy wytrzymałości. Udział energii właściwej objętościowej  $U_v$  w energii sprężystej jest tym większy, im funkcja  $\sigma_1(\varepsilon_1)$  jest bardziej wypukła w układzie współrzędnych  $\sigma_1, \varepsilon_1$ , a funkcja  $\nu(\varepsilon_1)$  jest bardziej wklęsła [19]. W warunkach jednoosiowego ściskania w zakresie odkształceń sprężystych energia właściwa  $U$  (energia całkowita podzielona przez objętość próbki) sprowadza się do sumy składowych, energii właściwej objętościowej  $U_v$  i energii właściwej postaciowej  $U_F$ :

$$U = U_v + U_F = \frac{(1 - \nu)\sigma_1^2}{6E} + \frac{2(1 + \nu)\sigma_1^2}{6E} = \frac{\sigma_1^2}{2E} \quad (1)$$

Energia gromadzona w trakcie ściskania próbki rośnie w fazie pierwszej, w drugiej – maleje wskutek „zużywania” zgromadzonej energii na pracę przesunięcia próbki, tj. powstawania i rozwoju spęków. Na początku fazy trzeciej energia objętościowa  $U_v$  ulega częściowo zamianie na energię kinetyczną, czyli tarcie i pęknięcie, powodując rozpad próbki. Im ilość energii zużywanej na tworzenie nowych spęków w fazie pokrytycznej jest mniejsza, tym rozpad skały jest bardziej gwałtowny. Dla skał i gruntów graniczne naprężenia określa się na ogół obwiednią Coulomba-Mohra, wiążącą stan naprężenia, wytrzymałość i kąt nachylenia płaszczyzny pęknięcia do kierunków naprężeń głównych.

Wytrzymałość, podobnie jak granica plastyczności, należy do właściwości progowych skał wyrażonych zawsze funkcją naprężeń głównych; w hipotezie wytrzymałościowej Hubera-Misesa-Henky'ego jest to naprężenie efektywne  $s_{ef}$  w postaci

$$\sigma_{ef} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (2)$$

W trójosiowym ściskaniu z ciśnieniem okólnym  $\sigma_3 = \nu_2$  naprężenie efektywne jest  $\sigma_{ef} = \sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_1 - \sigma_3$  i jest równe intensywności naprężenia  $\sigma_{in}$ , czyli różnicy naprężeń głównych  $\sigma_{in} = \sigma_1 - \sigma_3$ . W jednoosiowym ściskaniu  $\sigma_{ef} = \sigma_{in} = \sigma_1$ , bo w tym teście  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ .

Cechą skał jest wybitne zróżnicowanie wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie. Dla soli kamiennej wytrzymałość na rozciąganie jest mniejsza niż 1 MPa. W badaniach w IMG PAN w trójosiowej prasie GTA o nacisku do 350 MPa Gustkiewicz stwierdził, że już dla ciśnienia okólnego przekraczającego 50 MPa granica wytrzymałości soli kamiennych jest stała, nie zmienia się z przyrostem ujemnych wartości  $s_2 = s_3$ . Podobny wynik w testach trójosiowych dla ciśnienia okólnego przekraczającego 20 MPa uzyskała w badaniach KGiGG AGH\* Flisiak [6]. Wyniki badań laboratoryjnych IMG PAN i OBR

\* Katedra Geomechaniki i Geoinżynierii i Górniczej Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie

„Chemkop”<sup>\*\*\*</sup> ujął Autor wzorem empirycznym w [3, 16]. Przy założeniu, że istnieje asymptota  $\sigma_1 - \sigma_3$  równoległa do osi  $\sigma_2 = \sigma_3$  o wartości  $\Delta\sigma_{max}$ . W tym ujęciu graniczną intensywność naprężenia określa  ${}^R\sigma_{in}$ :

$${}^R\sigma_{in} = {}^R(\sigma_1 - \sigma_3) = \Delta\sigma_{max} [1 - \exp(-\frac{\sigma_3 - 2R_r}{\sigma_p})] R_r, \quad \text{dla } s_1 < s_2 = s_3, \\ R_r(t) = 1 - 0,059 \ln(t/t_j), \quad t_j = 1 \text{ doba}, \quad (3)$$

gdzie:

- $\Delta\sigma_{max}$  – jest asymptotyczną różnicą naprężeń próbki, przyjęto  $\Delta\sigma_{max} = -86$  MPa,
- $\sigma_p$  – jest parametrem [MPa], przyjęto  $\sigma_p = -3.8$  MPa,
- $R_r$  – jest wytrzymałością na rozciąganie próbki, przyjęto  $R_r = +0.6$  MPa,
- $R_r(t)$  – określa funkcję zmiany wytrzymałości w czasie  $t$ , doba.

Wtedy wyrażenie jest funkcją skalarną pola tensorowego naprężenia, którą określa stosunek  $(\sigma_1 - \sigma_3)/{}^R\sigma_{in}$ . Funkcja (3) wiąże naprężenie okólne z granicznym naprężeniem różnicowym, czyli z graniczną intensywnością naprężenia. Określa granicę wytrzymałości – ponad którą występuje pękanie kruche – przechodzącą z przyrostem ujemnego naprężenia okólnego w granicę – ponad którą występują zachowania ciągliwe. Wykres przedstawiono na rysunku 3.

Na ogół przyjmuje się, że wytrzymałość długotrwała soli kamiennych jest w przybliżeniu dwukrotnie mniejsza od wytrzymałości doraźnej. Wartości funkcji  $R_r(t)$  w postaci przedstawionej przez Avdeev’a [1] dla kilku okresów *trwałości* próbki  $t \in [0.1, 1, 10, 50 \text{ lat}]$  otrzymuje się odpowiednio  $R_r(t) \in [0.70, 0.65, 0.52, 0.48]$ . W wyrażeniu wytrzymałości jako funkcji malejącej w czasie, uwzględnia się fakt, że wytrzymałość pod wpływem rozwoju spekań zmniejsza się.

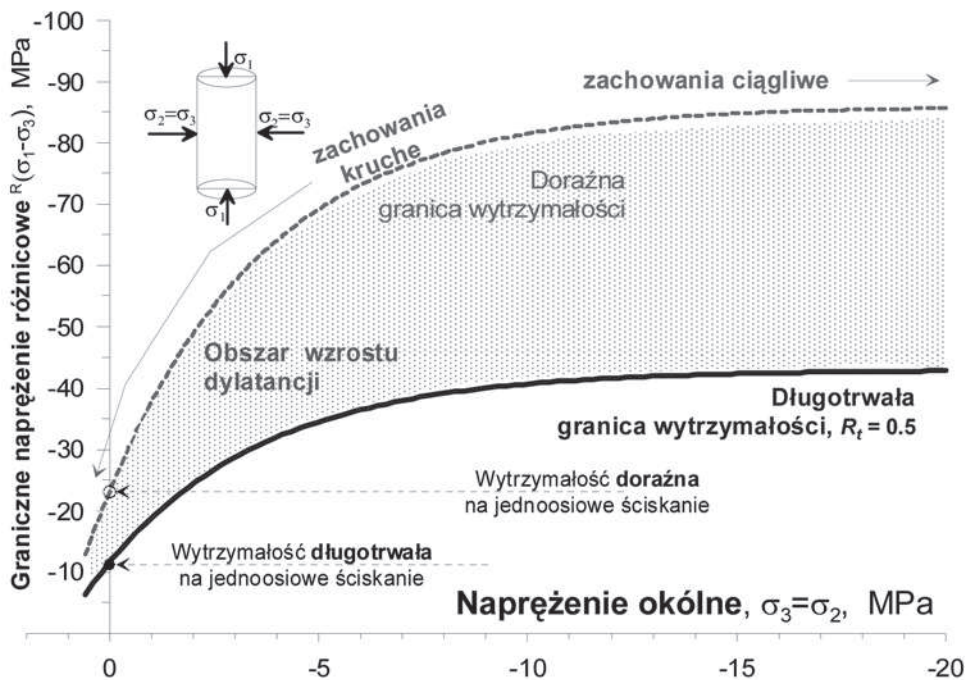
#### 4. Pelzanie soli kamiennej w testach laboratoryjnych

Geodynamiczne badania skorupy ziemskiej wykazują, że zależnie od naprężenia, temperatury i czasu, skały zachowują się jak ciała stałe lub płyny. Skały solne już w niskich temperaturach i krótkim czasie wykazują właściwości reologiczne, przejawiające się pelzaniem i relaksacją naprężeń. Prędkość pelzania zwiększa się ze wzrostem naprężenia efektywnego. W trakcie pelzania następuje zamiana energii odkształcenia sprężystego na energię odkształcenia lepkiego, inicjując relaksację naprężenia, czyli wyrównywanie się naprężeń głównych. Szybkość tego procesu rośnie z podatnością skał na pelzanie.

Podatność na pelzanie soli kamiennych zależy od wilgotności i temperatury. Wpływ wilgotności na prędkość pelzania wyjaśnić można zmianą warunków tarcia statycznego i dynamicznego. Pod wpływem kontaktu z wodą, według Joffiego w [4], kryształy NaCl stają się ciągliwe i wtedy zmniejsza się tarcie dynamiczne. Po wysuszeniu odwrotnie – ponownie wzrasta ich kruchość, bo krystalizacja tworzy spiętrzenia blokujące poślizg, powodując wzrost tarcia statycznego i spowolnienie ruchu, zatrzymanie lub nawet chwilowe cofnięcie.

W metalach, a także w skałach solnych [25], a szczególnie w solach kamiennych wzrost prędkości pelzania soli kamiennej z temperaturą i naprężeniem określa potęgowe prawo pelzania Nortona, sformułowane w 1923 r., obecnie powszechnie stosowane w modelach geomechanicznych soli kamiennych. Wpływ temperatury na prędkość pelzania określa funkcja wykładnicza (4). W modelach reologicznych, sprężysto-lepkich, odkształcenie  $e$  jest sumą odkształcenia sprężystego  ${}^e\epsilon$  i lepkiego  ${}^v\epsilon$ , czyli  $\epsilon = {}^e\epsilon + {}^v\epsilon$ , gdzie:

$${}^v\epsilon(t) = A \exp[-Q/RT] \sigma_{ef}^n t = B \sigma_{ef}^n t. \quad (4)$$



Rys. 3. Wytrzymałość próbek soli w badaniach laboratoryjnych [16]

Fig. 3. Rock salt sample strength in laboratory tests [16]

\*\*) Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Górnictwa Surowców Chemicznych „CHEMKOP”

We wzorze (4)  $A$ , i  $n > 1$  są stałymi materiałowymi,  $Q$  – energią aktywacji,  $R$  – stałą termodynamiczną, a  $B$  jest podatnością na pełzanie w ustalonej temperaturze  $T$ . Badania jednoosiowego pełzania próbek soli kamiennej wskazują także na potęgowy związek prędkości pełzania z wilgotnością powietrza.

Właściwości sprężysto-lepkie i potęgowe prawo pełzania ujawnia się w testach pełzania próbek soli kamiennej. W pełzaniu wyróżnia się: *fazę 1* – charakteryzującą się spadkiem prędkości pełzania w czasie, w pewnych warunkach, *fazę 2* – określaną pełzaniem *stacjonarnym* ze stałą prędkością charakterystyczną dla płynięcia cieczy *fazę 3* – pełzania *progresywnego* ze wzrostem prędkości pełzania. Ponieważ faza 3 kończy się zawsze zniszczeniem próbki, czyli występuje, gdy naprężenia przekraczają granicę długotrwałej wytrzymałości. Wyniki testu trójosiowego pełzania próbek soli przy zachowaniu stałej temperatury, wykonanego przez W. Kasprzyka w laboratorium OBR „Chemkop” [3], oraz ich aproksymacje przeprowadzone przez Autora funkcją (5) dla  $\mu=0$  przedstawiono na rysunku 4.

W ujęciu funkcyjnym, zależność odkształcenia podłużnego  $\varepsilon(t)$  próbek skał solnych serii II ÷ IV (rys. 4) od czasu  $t$  przy różnych wartościach naprężenia wyrażają funkcje potęgowe czasu w postaci:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \varepsilon_j \tau^m, \text{ dla } m(\tau) = m_0 + \mu(\tau), \tau = t/t_j \quad (5)$$

gdzie  $\varepsilon_0$  jest natychmiastowym odkształceniem sprężystym, zależnym od naprężenia efektywnego i odwrotnie proporcjonalnym do modułu odkształceń  $E$ . Wielkość  $\varepsilon$ , określa początkowy przyrost odkształcenia w czasie jednostkowym, tu  $t_j = 1$  godzina. Wielkość  $m$  jest parametrem funkcji aproksymacyjnej. Jeżeli jednak w trakcie pełzania zmieniają się

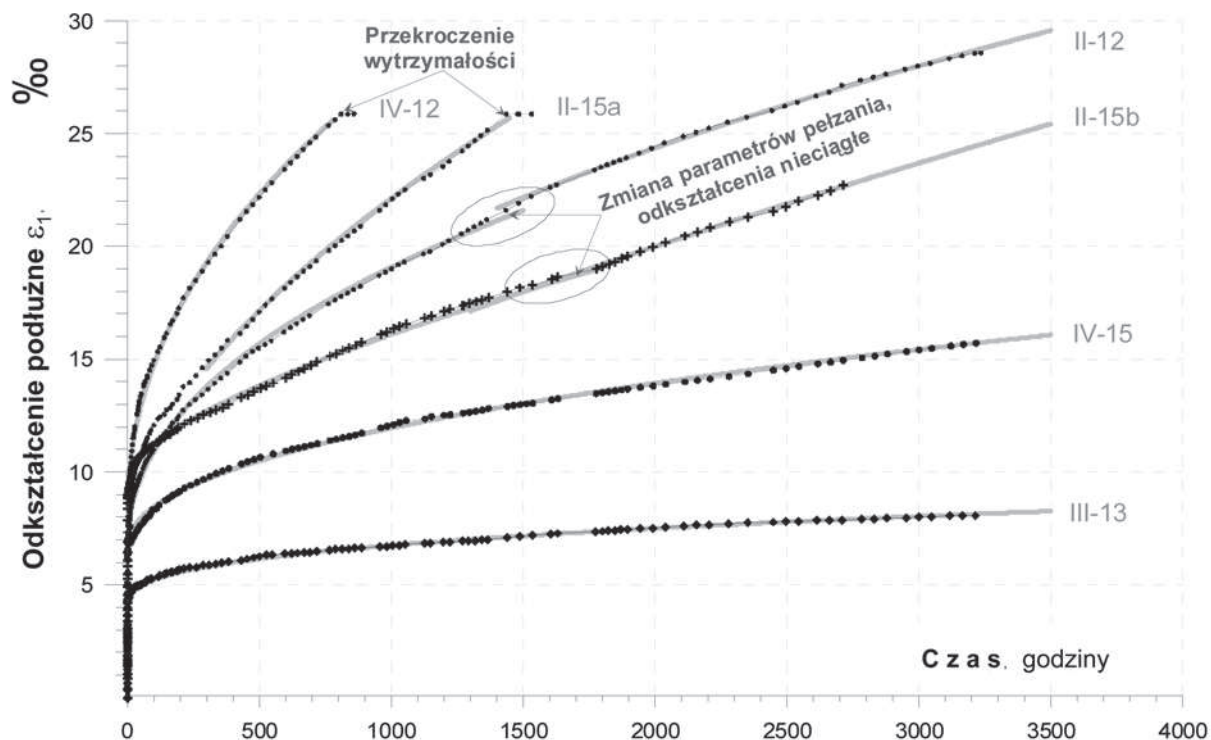
właściwości próbki, na przykład w wyniku wzrostu gęstości spękań, to  $m$  staje się funkcją czasu i wtedy parametrem jest  $\mu$ .

W trakcie pełzania powstawać mogą nowe spękania, jak w próbkach II-12 i II-15b (rys. 4), powodując zmianę podatności na pełzanie w próbce II-15b, a w próbce II-12 spadek wartości modułu odkształceń  $E$ . Pęknięcie doprowadzić może do przekroczenia wytrzymałości po okresowym pełzaniu, jak w próbkach II-15a i IV-12, i do ich zniszczenia.

W warunkach obciążenia próbki naprężeniem przekraczającym długotrwałą wytrzymałość, prędkości pełzania rośnie jeżeli  $\mu > 0$ . Na rysunku 5 przedstawiono trzy przykłady funkcji aproksymacyjnej (5): funkcja 1 – odpowiada pierwszej fazie pełzania z malejącą prędkością i wtedy  $m = \text{const} < 1$ , funkcja 2 – pełzaniu ze stałą prędkością i wtedy  $m = 1$ , funkcja 3 dla  $\mu > 0$  – jest początkowo zgodna z 1 fazą pełzania, potem w przybliżeniu jest równoległa do funkcji 2 odpowiadającej fazie pełzania *stacjonarnego*, i następnie odpowiada fazie pełzania *progresywnego* z rosnącą prędkością.

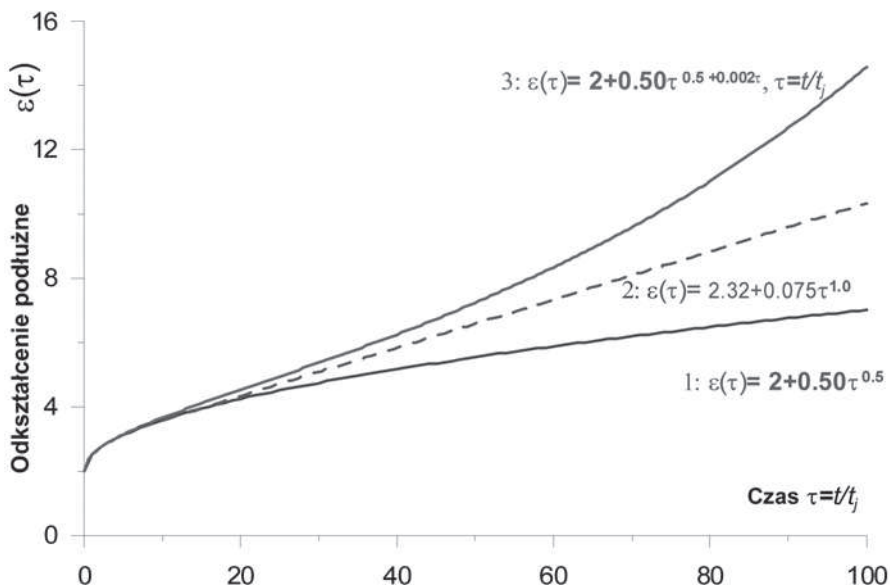
Wzrost w trakcie pełzania wartości wykładnika  $m(t)$  w (5) symuluje wzrost podatności na pełzanie z powodu narastającej gęstości spękań, wzrostu temperatury czy wilgotności.

Sposób pęknięcia w testach doraźnych i długotrwałych zależy od rozkładu naprężenia w próbce, który z kolei silnie zależy od warunków jej *kontaktu* z prasą [9]. Jeżeli na kontakcie występuje znaczne tarcie, walcowa próbka pod wpływem naprężenia zamienia się w beczkę, a spękania propagują od powierzchni bocznej do środka próbki, prowadząc do skośnego ścięcia próbki. Natomiast, jeżeli na kontakcie tarcie jest minimalne, próbka zachowuje formę cylindryczną i powstają spękania rozdzielcze w płaszczyznach równoległych do osi maksymalnego ściskania. Rozpoznanie wpływu warunków granicznych na rozkład naprężenia i sposób pęknięcia skał ma ważne znaczenie poznawcze.



Rys. 4. Zależność odkształceń soli kamiennej w czasie od naprężeń w testach pełzania, laboratorium geomechaniczne OBR „Chemkop” [3]

Fig. 4. Dependence of rock salt strain in time on stress in creep tests; Geomechanical Laboratory, OBR „Chemkop” [3]



Rys. 5. Przykłady funkcji różniących się wykładnikiem potęgowym (opracowanie własne)  
 Fig. 5. Examples of the functions with different exponents (own study)

5. Obserwacje górotworu solnego metodami geotechnicznymi

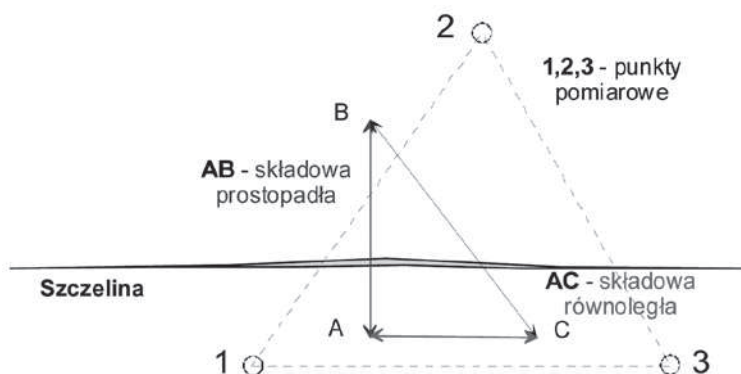
Różnorodność litologiczna i strukturalna skał solnych w górotworze praktycznie uniemożliwia zbadanie wszystkich podstawowych relacji wiążących stan naprężenia i odkształcenia z uwzględnieniem czasu. Laboratoryjne rozpoznanie właściwości próbek skał w otoczeniu wyrobisk nie wystarcza także do przewidywania rozwoju pęknięcia skał w warunkach zróżnicowanej litologicznie struktury masywu skalnego, który jest litologicznie niejednorodny, a kontakty skał zmieniają się w trakcie rozwoju ich spękania. W praktyce górniczej spowodowane tym kształtowanie się stanu zagrożenia identyfikuje się w obserwacjach i pomiarach geotechnicznych *in situ*.

Stosowanych jest wiele metod geotechnicznego badania skał *in situ*, których istotą jest rozróżnianie lub/i określenie właściwości skał, stanu naprężeń, odkształceń. Dla warunków kopalń węgla kamiennego badania te przedstawione zostały w pracy [7]. Zwykły, osłuchowy sposób identyfikacji spękań polega na porównaniu charakterystyki wibracji wywołanych ostukiwaniem skał o różnym stopniu spękania. Prostim instrumentem geotechnicznym jest młotek odbojny, którym mierzy się długość drogi powrotu młota *d* po udarze skały z zadaną siłą. Spękanie skał określa się przez porównanie z odbiciem *D* od skał niespękanych. Przedstawione wyniki w [7] wska-

zuja, że wartości wskaźnika *d/D* rosną potęgowo z modułem sprężystości *E* i wytrzymałością. Ponieważ spękanie skał zmienia ich właściwości mechaniczne, akustyczne, termiczne, elektryczne czy magnetyczne, to identyfikować je oczywiście można różnymi czułymi na te zmiany instrumentami.

Na uwagę zasługuje tu kilka innych sposobów pomiarów geotechnicznych przeprowadzanych w polskich kopalniach soli: badanie ciśnienia granicznego inicjującego spękanie skał w testach mikroszczelinowania, odkształcalności i wytrzymałości penetrometrem otworowym oraz emisji akustycznej powodowanej mikrospękaniami w trakcie pełzania soli w filarach i półkach. W kopalni Wieliczka prowadzi się obserwacje kilkunastu szczelin, mierząc jednak tylko ich rozwarcie. Wyniki tych pomiarów omawia Szewczyk [26].

Odształcenia i rozwój szczelin na ścianach wyrobisk identyfikowane są poprzez pomiary zmian odległości punktów przy szczelinie. Wiadomo, że powstanie szczeliny poprzedza odkształcenie, które w przestrzeni 3D jest tensorem symetrycznym  $\epsilon_{ij}$  drugiego rzędu o 9 składowych. Na ścianie wyrobiska, na przykład prostopadłej do kierunku *Z* w układzie współrzędnych *X, Y, Z*, pojawia się odkształcenie płaskie, które określają trzy różniące się składowe  $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_{xy} = \epsilon_{yx}$ . Jeżeli założone zostaną w tej ścianie trzy znaki, jak 1, 2, 3 na rysunku 6, to mierząc zmienne w czasie odległości między nimi  $d_{12}, d_{23}, d_{31}$  uzyskuje się układ równań,



Rys. 6. Stacja do obserwacji ruchu szczeliny na płaszczyźnie (opracowanie własne)  
 Fig. 6. Station for the observation of crack movement on a plane (own study)

których niewiadome określają przyrosty w czasie wartości odkształceń głównych i ich kierunki względem kierunku rozciągłości szczeliny. W następnym kroku wyliczyć można odkształcenia we wszystkich kierunkach, w tym w kierunku prostopadłym  $\varepsilon_{AB}$  i stycznym  $\varepsilon_{AC}$  do szczeliny.

Dla obserwacji rozwoju szczelin trzy znaki pomiarowe powinny być tak założone, aby spękanie przecinało dwa boki trójkąta 1, 2, 3 na rysunku 6. Znaki powinny być zakończone kuliście, a pomiar prowadzony dostosowanym do tego celu tensometrem mikrometrycznym z zalecaną dokładnością pomiaru około  $\pm 0.03$  mm.

W praktyce kopalnianej obserwacje szczelin na ogół sprowadza się do pomiaru odległości tylko między dwoma punktami wzdłuż kierunku prostopadłego do szczeliny. Wtedy jednak ich wyniki są niepełne, bo sygnalizują tylko zmiany składowej prostopadłej, a ściślej jej rzutu na płaszczyznę ściany.

## 6. Przesunięcia i sygnały pęknięcia obserwowane czujnikami ruchu

Zachowanie się górotworu obserwowane jest na ogół w charakterystycznych dla formy wyrobiska miejscach oraz w strefach zwiększonego zagrożenia obwałem skał. Czujniki służące obserwacjom przemieszczeń zakładane są na ogół w stropie komór. Powstawanie spękań w górotworze wymaga dostarczania grawitacyjnej energii obciążenia masowych. Ruch górotworu poprzedza wtedy: (i) narastające gromadzenie energii ze wzrostem odkształcenia sprężystego, (ii) gdy ilość energii wystarcza do pokonania tarcia statycznego następuje (iii) rozpoczęcie ruchu z odprężeniem i zużywaniem części zgromadzonej energii na tarcie dynamiczne oraz jej rozpraszanie poprzez zamianę na ciepło, następnie (iv) zatrzymanie ruchu, gdy malejąca ilość zgromadzonej energii i tempo dopływu energii potencjalnej nie wystarczy na pokonywanie tarcia dynamicznego. Potem następuje ponowne gromadzenie energii odkształcenia sprężystego w cyklu określanym terminem *stick and sleep* [27].

Zamiana energii potencjalnej poprzez tarcie na ciepło zależy od właściwości górotworu. Skały, a także masywne materiały obudowy, wykazują zróżnicowaną odkształcalność objętościową i postaciową. W skałach o niskich wartościach

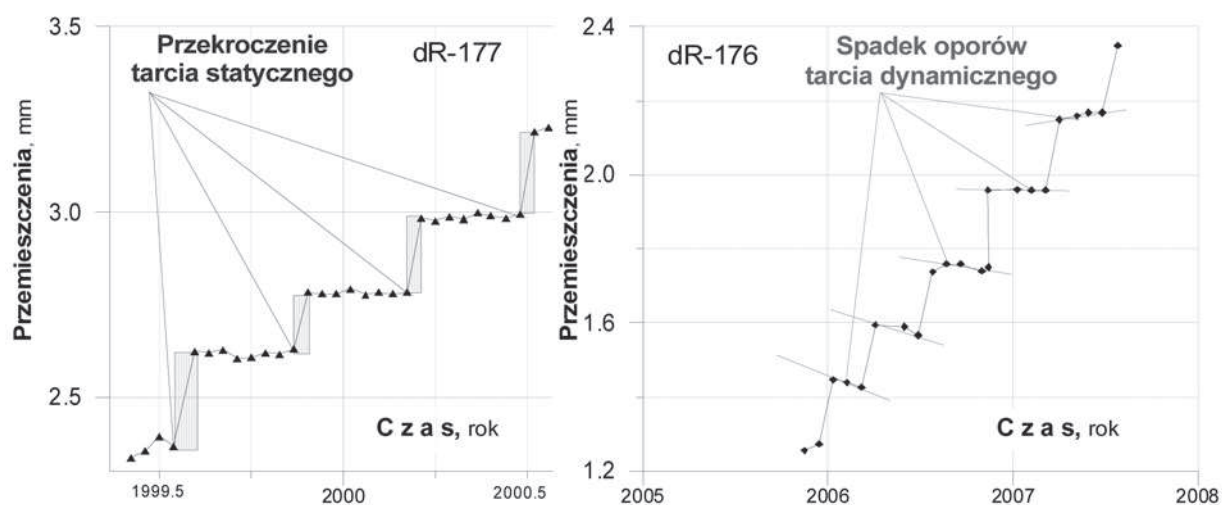
modułu odkształceń, już przy niewielkich różnicach naprężeń następuje pokonanie granicy tarcia statycznego, a ruch i rozpraszanie energii postępuje przy utrzymywaniu się niewielkich różnic naprężeń głównych. Natomiast w skałach i materiałach sztywnych, czyli o wysokich wartościach modułu odkształceń, ilość gromadzonej energii sprężystej przy tym samym odkształceniu jest większa. Pękaniu towarzyszyć mogą wtedy nie tylko efekty akustyczne, ale w pewnych przypadkach nawet wstrząsy górnicze, obejmujące nawet znaczną przestrzeń górotworu.

Na uwagę zasługuje to, że dostępne do obserwacji zmniejszenie prędkości przemieszczeń, a potem zatrzymanie ruchu występuje *ante factum*, czyli przed niebezpiecznym procesem uwolnienia energii, która doprowadzić może do niebezpiecznych deformacji nieciągłych; natomiast nagły wzrost prędkości przemieszczeń występuje *post factum*, czyli po wcześniejszym zatrzymaniu lub spowolnieniu ruchu.

W górotworze o właściwościach reologicznych pełzanie skał ogranicza ilość akumulowanej energii. Dlatego na przykład w górotworze nad pokładem miedzi w rejonie występowania pokładu soli kamiennej w Sieroszowicach wykształciły się liczne fałdy skalne, a poza nim – uskoki. Wzrost naprężeń w przewarstwieniach skał sztywnych, niezgodnie przemieszczających się ze skałami miękkimi prowadzi do ich spękania, przez co wzrasta ich podatność na pełzanie i zgodność z kierunkiem płynięcia. Efekty tego zjawiska zauważyć można w profilach geologicznych na ścianach niektórych wyrobisk w kopalniach soli, szczególnie w Bochni i w Wieliczce.

Przykład procesu pełzania z efektami pokonywania tarcia statycznego i dynamicznego ilustrują wyniki obserwacji przemieszczeń stropu komór w kopalni Wieliczka. Na rysunku 7 lewym – przekraczanie tarcia statycznego i skokowe przyrosty przemieszczenia przedzielają czteromiesięczne okresy zatrzymania ruchu. Na rysunku 7 prawym – przedzielają je najpierw ujemne, potem dodatnie przyrosty przemieszczeń, co wskazuje na wzrost w czasie podatności na pełzanie. Wzrost prędkości przemieszczeń w 5 okresach w czasie 15 miesięcy (rys. 7 prawy) jest sygnałem zmniejszania oporów tarcia dynamicznego.

Pomijając krótkookresowe fluktuacje, długotrwałe przemieszczenia stropu – podobnie jak pełzanie próbek skał – aproksymuje funkcja potęgowa  $w(t)$  w postaci:



Rys. 7. Przejawy tarcia statycznego i dynamicznego w ruchu górotworu obserwowane w komórce Pieskowa Skala w kopalni Wieliczka (opracowanie własne)

Fig. 7. Occurrences of static and dynamic friction in the rock mass movement, observed in Pieskowa Skala Chamber of the Wieliczka Salt Mine (own study)

$$w(\tau) = w_j \tau^m, \quad \tau = (t - t_0) / t_j \quad (6)$$

$$dw/d\tau = m v_j \tau^{m-1}$$

gdzie  $t_j$  jest jednostką czasu, np.  $t_j=1$  rok,  $t_0$  jest czasem początkowym,  $v_j = w_j/t_j$  jest prędkością przemieszczeń w czasie  $t_j=t-t_0$ , a  $m$  jest parametrem charakteryzującym obserwowany ruch. Jeżeli  $m < 1$  to prędkość przemieszczeń  $dw/dt$  maleje, a gdy  $m > 1$  – prędkość rośnie. Przemieszczenia z rosnącą prędkością dla  $m = 1.25$  obserwowane jest w komorze Warszawa (rys. 8), a dla  $m = 1.21$  i  $m = 1.61$  w komorze Pompownia (rys. 10). Długotrwałe utrzymywanie się stałych wartości parametru ruchu  $m$  jest sygnałem ustalonych korzystnych lub niekorzystnych warunków odkształcania górotworu w rejonie założonych czujników.

Ruch górotworu identyfikowany jest i rozpoznawany w różnej skali wymiarów przestrzennych, na przykład w skali:

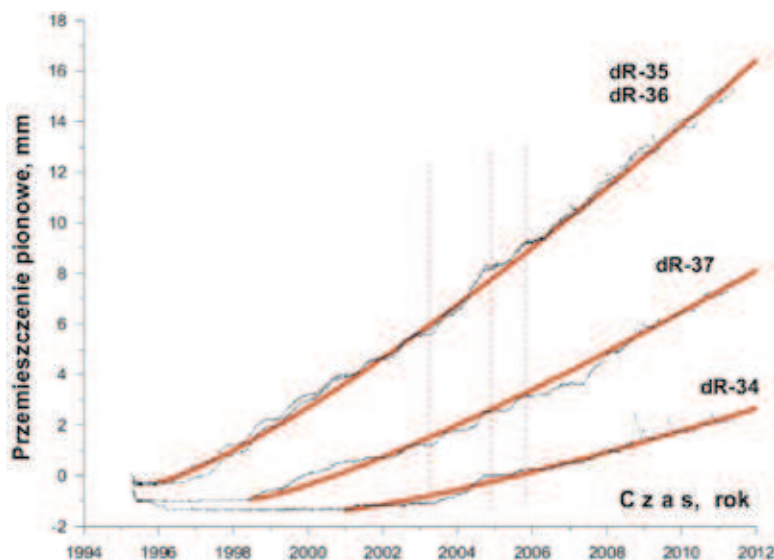
- małych wymiarów – kilku metrów strefa ściany/stropu komory,
- średnich wymiarów – kilkudziesięciu metrów – komora, zespół wyrobisk chodnikowych,

- wielkich wymiarów – kilku setek metrów – zespoły komór, poziomy, pola górnicze.

W pewnych obszarach występować może koordynacja ruchu w czasie, czyli podobne sekwencje ruchu w odrębnych miejscach w tym samym okresie czasu. Obszar koordynacji występować może w małej, średniej i wielkiej skali wymiarów. Takie skoordynowanie ruchu obserwowano na przykład w stropie komór Pieskowa Skala i Staszic (rys. 9 i 10).

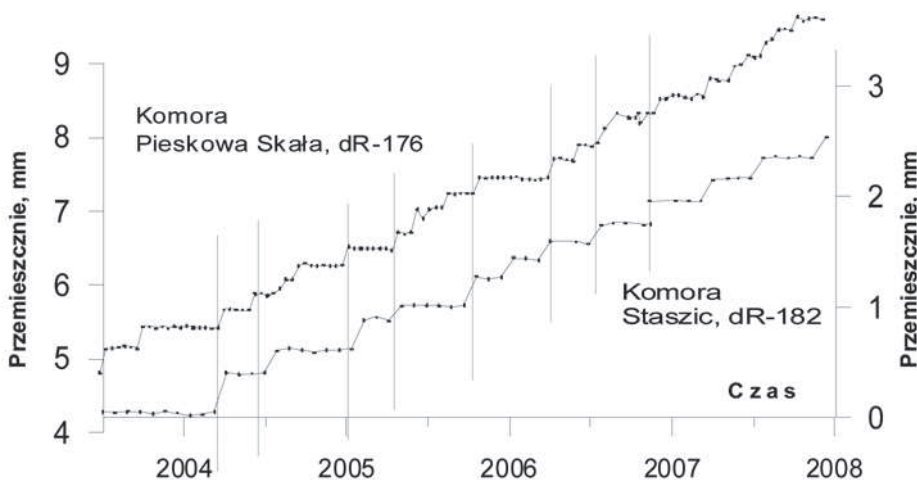
Skoordynowane ruchy są następstwem wspólnej przyczyny. Uwalniana energia rośnie ze skalą wymiarów. Przykładem czasowej koordynacji ruchów wielkoobszarowych było występowanie drgań rejestrowanych w kilku komorach w latach 2007 – 2009, na kilku poziomach w kopalni Wieliczka [14].

Ruch górotworu wykazywać może periodyczność, spowodowaną zmianami podatności na pęcznienie. Ruch o okresie 1 roku, ujawniający sezonowe zmiany wilgotności powietrza kopalnianego, obserwowany był w szeregu komór, najwyraźniej w komorze Ważyn w Bochni [11] i komorze Pompownia w Wieliczce (rys. 10).



Rys. 8. Przemieszczenia stropu mierzone czujnikami ruchu dR w komorze Warszawa [14]

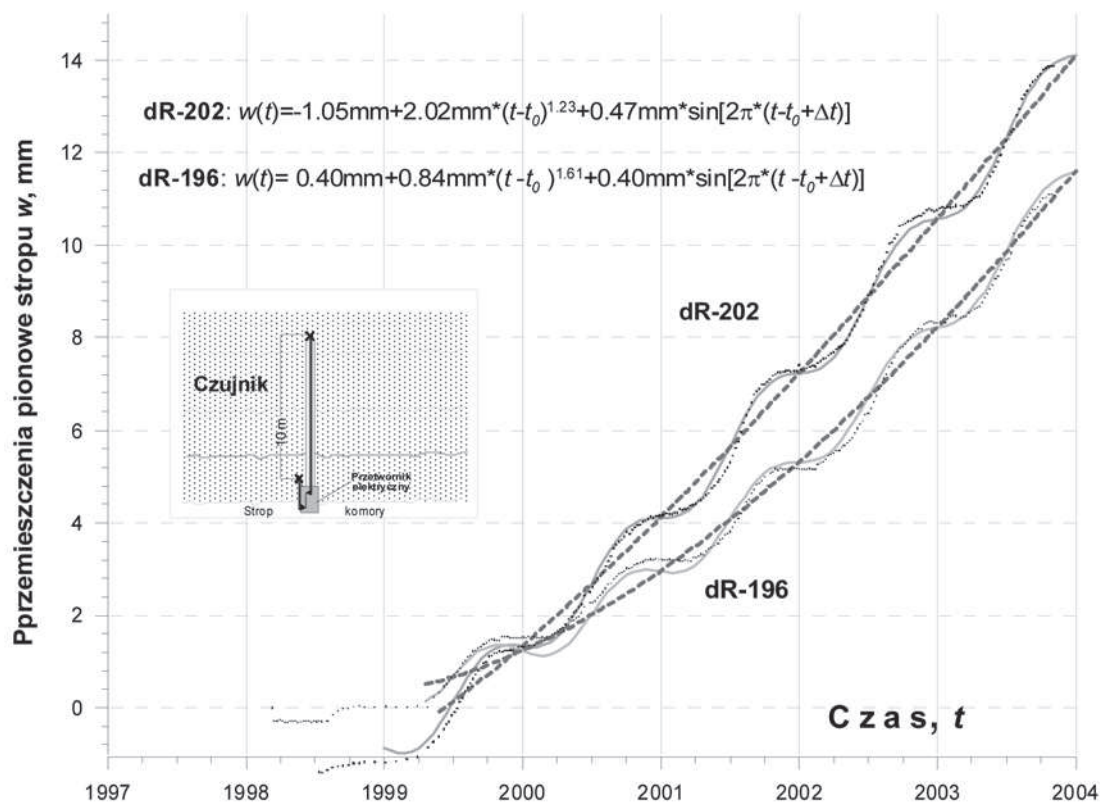
Fig. 8. Displacements of the roof identified by dR movement sensors in the Warszawa Chamber [14]



Rys. 9. Koordynacja ruchu periodycznego w stropie komór Pieskowa Skala i Staszic w kopalni Wieliczka [14]

Fig. 9. Coordination of the periodic movements in the roof of the Pieskowa Skala and Staszic Chambers of the Wieliczka Salt Mine [14]





Rys. 10. Aproksymacja sezonowych fluktuacji przemieszczeń w komorze Pompownia [14]

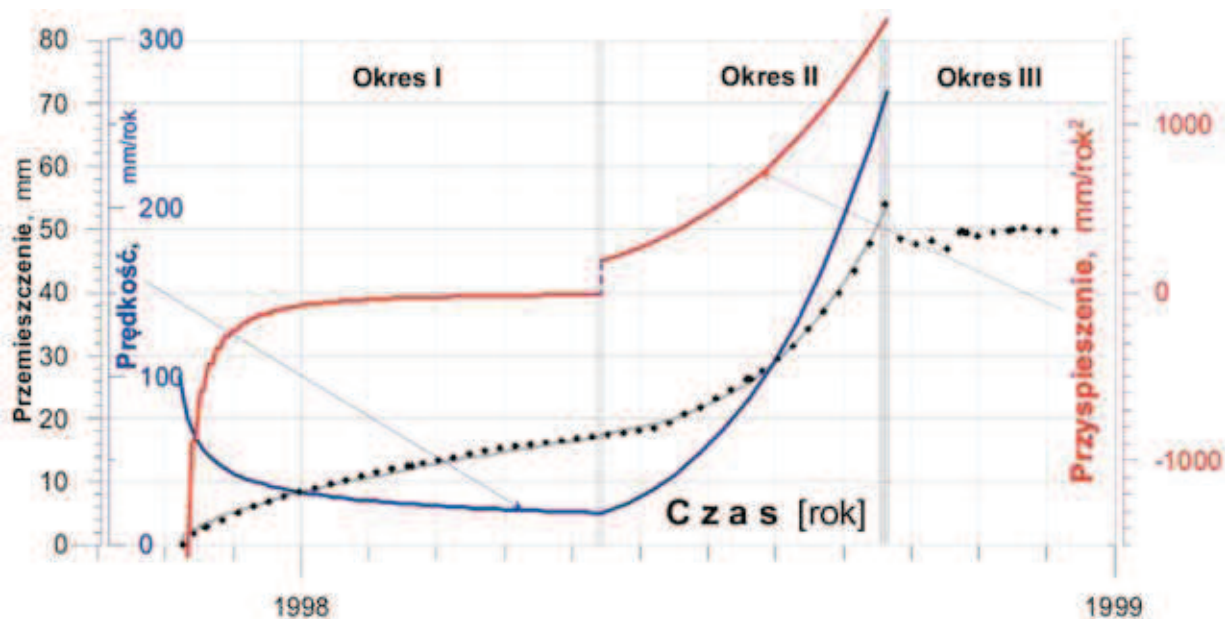
Fig. 10. Approximation of the seasonal displacements fluctuation in the Pompownia Chamber [14]

Wyniki obserwacji zmian sezonowych aproksymuje suma dwóch funkcji, potęgowej z wykładnikiem  $m = 1,23$  lub  $m = 1.61$  i okresowej z cyklem 1 roku (rys. 10) w ogólnej postaci

$$w(t) = c_1 + c_2 \left( \frac{t - t_0}{t_j} \right)^m + c_3 \sin \left[ 2\pi + c_4 \left( \frac{t - t_0 + \Delta t}{t_j} \right) \right] \quad (7)$$

gdzie współczynniki  $t_0$ ,  $m$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ ,  $c_4$  są stałymi dobranymi do wyników pomiarów, a  $\Delta t$  jest stałym półrocznym przesunięciem początku cyklu.

Sygnalem nadchodzącego obwalu skał jest znaczny i trwały wzrost przyspieszenia. Proces taki jest trudny do zarejestrowania, bo na ogół powoduje już w początkowej fazie zniszczenie czujnika. W komorze Gołuchowski na III poziomie w kopalni Wieliczka w 1998 r. obwał nastąpił w pobliżu czujnika, nie powodując jego zniszczenia [11]. Dzięki temu uzyskano unikalną rejestrację przemieszczeń w pobliżu obwalu skał (rys. 11).



Rys. 11. Przemieszczenia, ich prędkości i przyspieszenia zarejestrowane w komorze Gołuchowski przed obwalem stropu [11]

Fig. 11. Displacements, their rates, and accelerations recorded in the Gołuchowski Chamber before the roof collapse [11]

W pierwszym okresie, do maja 1998 r. prędkość obniżania się stropu komory malała w funkcji potęgowej  $w(t) = -25mm/(t/1997.85)^{0.59}$ , gdzie  $t_j = 1$  rok. W okresie 7 miesięcy postępowała akumulacja energii w skałach stropowych, która na granicy I i II okresu inicjowała deformacje nieciągłe, pęknięcia skał, a potem ich obwał. W I okresie prędkość przemieszczeń zmniejszała się do 20 mm/rok, a przyspieszenia dążyły do zera, aż do chwili powstania nieciągłości. Na granicy okresów I i II we wrześniu 1998 r. nastąpił skokowy wzrost przyspieszenia o ok. 200 mm/rok<sup>2</sup>. W drugim okresie obserwowany był rozwój nieciągłości ze wzrostem przyspieszenia do ok. 1600 mm/rok<sup>2</sup> na granicy okresów II i III. Gdyby nie zabezpieczono stropu, w kolejnych latach nastąpić mogłyby kolejne cykle ruchu z obwałem skał stopowych. Wtedy wykres na rysunku 11 byłby jednym z wielu możliwych etapów procesu obwał skał. W porównaniu z procesem pokazanym na rys. 7 różniłby się oczywiście skalą czasu i wymiarów.

**7. Obserwacje konwergencji wyrobisk, deformacji calizn i wytyżenia**

Rozpowszechnienie pomiarów konwergencji i deformacji calizn w polskich kopalniach soli inicjowane były przez Autora po katastrofalnym zatopieniu kopalni w Wapnie w 1977 r. Chociaż stały się rutynowym sposobem obserwacji, rzadko powiązane są z ich interpretacją geomechaniczną, jak w [22], czy chociażby określaniem zaciskania wyrobisk, wyrażonym konwergencją objętościową.

Pomiary konwergencji w kopalniach podziemnych polegają na określaniu zmieniającej się w czasie odległości między punktami na ścianach wyrobisk, głównie między stropem a spągiem. Ponieważ konwergencja liniowa określa zmianę odległości, udział przemieszczeń stropu może być rozpoznany tylko wtedy, jeżeli wysokości punktów będą okresowo wyznaczane w odniesieniu do punktów stałych [18]. Zasadę tę wprowadzono w ostatnich latach przy obserwacji konwergencji wykonywanych przez służbę mierniczą kopalni Bochnia.

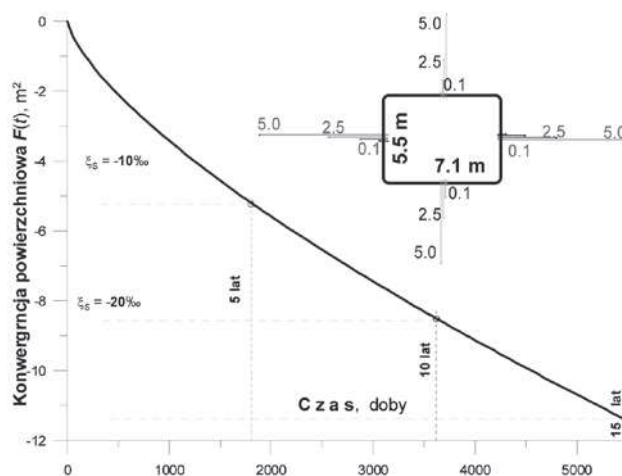
Celem głównym pomiarów konwergencji powinno być określenie zaciskania wyrobisk, kształtowania się długotrwałej tendencji ruchu oraz pozyskanie danych o warunkach i właściwościach geomechanicznych skał. Wobec braku innych obserwacji sygnalizować mogą w pewnych warunkach rozwój deformacji nieciągłych. Przykładami wyników obserwacji konwergencji jest: (i) określenie zaciskania – tabela 1, (ii) obserwacji długookresowych tendencji ruchu – wykres na rysunku 14, (iii) pozyskania parametrów prawa pełzania modelu sprężysto-lepkiego poprzez analizę odwrotną – w pracy Maj [22].

Badania deformacji calizn, w odróżnieniu od badań konwergencji skierowanych na obserwacje pustek, dotyczą deformacji filarów, półek i calizn w otoczeniu wyrobisk. Służyć

powinny określeniu rozkładu i rozwoju w czasie odkształceń w caliznach, określeniu właściwości geomechanicznych, w szczególności wytrzymałości. Pomiar deformacji otoczenia wyrobisk wymagają na ogół założenia szeregu baz z punktami w głębi calizny w różnych odległościach od konturu wyrobiska. Takie obserwacje prowadzone były w kopalniach soli w Kłodawie, Siedlcu, Bochni i Sieroszowicach.

Spękania prowadzące do degradacji filarów obserwowano w kopalni soli w Wapnie; także w Wieliczce, szczególnie na poziomie Kołobrzeg. Sygnałem nadmiernych wytyżeń są rejestracje deformacji i rozwoju spękań i szczelin w caliznach. W filarach międzykomorowych w polu 2 w kopalni Kłodawa na głębokościach większych niż 600 m od lat postępuje ciągle rozwój spękań rozdzielczych o rozwarości sięgającej obecnie nawet kilku centymetrów, wykształcających się w płaszczyznach pionowych równoległych do dłuższego poziomego wymiaru komór. Na uwagę zasługuje to, że obliczone doraźne naprężenia w tych filarach były mniejsze od wytrzymałości doraźnej próbek soli, ale większe od ich wytrzymałości długotrwałej. Deformacje filarów przy naprężeniach przekraczających granicę długotrwałej wytrzymałości jest analogiczne jak próbek opisanych funkcją 3 na rysunku 5.

Dla określenia przyrostów w czasie konwergencji i deformacji calizn, w kopalni soli w Sieroszowicach (LGOM) na głębokości 900 m, założona została stacja pomiarowa ze znakami umieszczonymi na kierunkach osiowych, w kilku odległościach od konturu poziomego chodnika (rys. 12).



Rys. 12. Konwergencja powierzchniowa przekroju poprzecznego chodnika w kopalni Sieroszowice (opracowanie własne)

Fig. 12. Areal convergence of the gallery cross-section in the Sieroszowice Salt Mine (own study)

**Tabela 1. Warunki i wskaźniki zaciskania kaplic Św. Kingi w Wieliczce i w Bochni [10]**  
**Table 1. Conditions and indications of room closure in the St. Kinga’s Chapels of the Wieliczka and Bochnia Salt Mines [10]**

Kaplica Św. Kingi w kopalni soli:	Wieliczka	Bochnia
Wymiary poziome maksymalne	16.4 x 42.2 m	18.2 x 26.2 m
Wysokość maksymalna	11.2 m	6.5 m
Głębokość i naprężenia litostatyczne	100 m; 2.3 MPa	212 m; 4.9 MPa
Obniżenia spągu	-24 mm/rok	-14 mm/rok
Względne prędkości konwergencji w kierunkach głównych (X,Y,Z)	-0.04 ‰/rok -0.06 ‰/rok -0.12 ‰/rok	-0.78 ‰/rok -0.76 ‰/rok -1.73 ‰/rok
Prędkość konwergencji względnej objętościowej komory	-0.22 ‰/rok	-3.3 ‰/rok
Okres ubytku 1% objętości komory	46 lat	3.0 lat

Wyniki kilkuletnich obserwacji pokazały, że względne konwergencje główne określają funkcje potęgowe czasu o dwóch wykładnikach potęgowych dla baz poziomych  $m=0.725$  i pionowych  $m=0.695$  [13]. Mniejszą wartość wykładnika  $m$ , niezgodną z zasadą wpływu kształtu przekroju pionowego chodnika, wyjaśnia Maj w [22] wspornikowym oddziaływaniem poziomej warstwy anhydrytu w stropie chodnika. Podobnie wpływa na konwergencje warstwy anhydrytu głównego w polu 2 w kopalni Kłodawa [17]. Funkcje opisujące zaciskanie tego chodnika prościej przedstawione zostały w pracy [15]. Względna konwergencja powierzchniowa chodnika  $\xi_s$ , przedstawiona na rysunku 12, jest częścią (2/3) sumy względnych konwergencji liniowych w kierunkach głównych – pionowym  $\xi_h$  i poziomym  $\xi_s$

$$\xi_s = \frac{2}{3} (\xi_s + \xi_h) = \frac{2}{3} [0.245(t/t_j)^{0.725} + 0.400(t/t_j)^{0.695}] \quad (8)$$

Zaciskanie chodnika o powierzchni początkowej przekroju pionowego  $S=sh=40.0 \text{ m}^2$ , czyli ubytek powierzchni pionowego przekroju chodnika, wyraża konwergencja powierzchniowa w przekroju poprzecznym chodnika  $S(t)$ :

$$S(t) = \xi_s(t)sh = \xi_s(t) * 5.52 * 7.24 \text{ m}^2 = 40.0 \text{ m}^2 \xi_s(t) \quad (9)$$

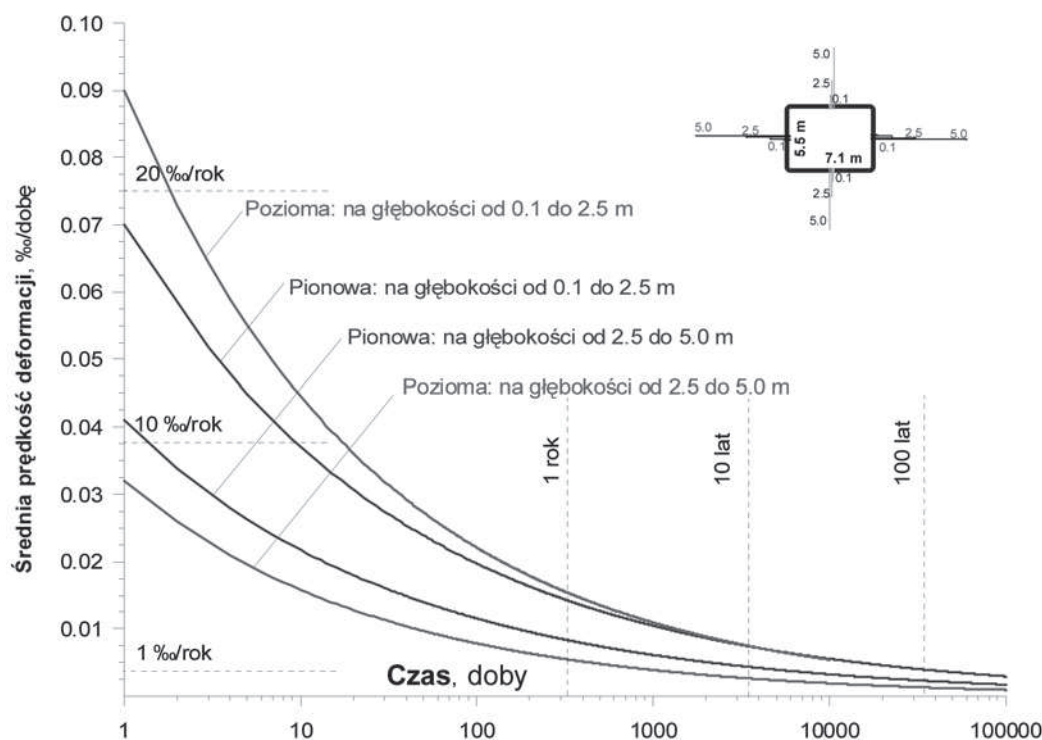
W kierunkach prostopadłych do osi podłużnej chodnika liniowe deformacje górotworu pionowe i poziome są zatem rozciąganiem. Postępując w obliczeniach podobnie jak poprzednio, z różnic przemieszczeń znaków pomiarowych zastabilizowanych w odległościach od powierzchni ścian chodnika 0.1 m, 2.5 m i 5.0 m można łatwo określić deformacje liniowe calizny dla odcinków: od 0.1 m do 2.5 m i od 2.5 m do 5.0 m. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 13.

Wartości deformacji wskazują, że występujące w tych warunkach odkształcenia rozciągające powodowały spękania

calizny z powierzchniami odspojeń o rozciągłości równoległej do osi podłużnej chodnika, a utrzymanie funkcjonalności wyrobiska już po kilku latach wymagało przeprowadzania okresowych przybierek. Z obliczeń wynika, że maksymalne prędkości deformacji, około +20%/rok, wystąpiły przy ociosach chodnika krótko po utworzeniu chodnika, potem z upływem czasu prędkość deformacji zmniejszała się. W przedziale czasu  $t > 10$  lat prognozowane prędkości deformacji są bardzo małe (rys. 13) i w krótkich okresach czasu mogą być uważane w przybliżeniu za stałe.

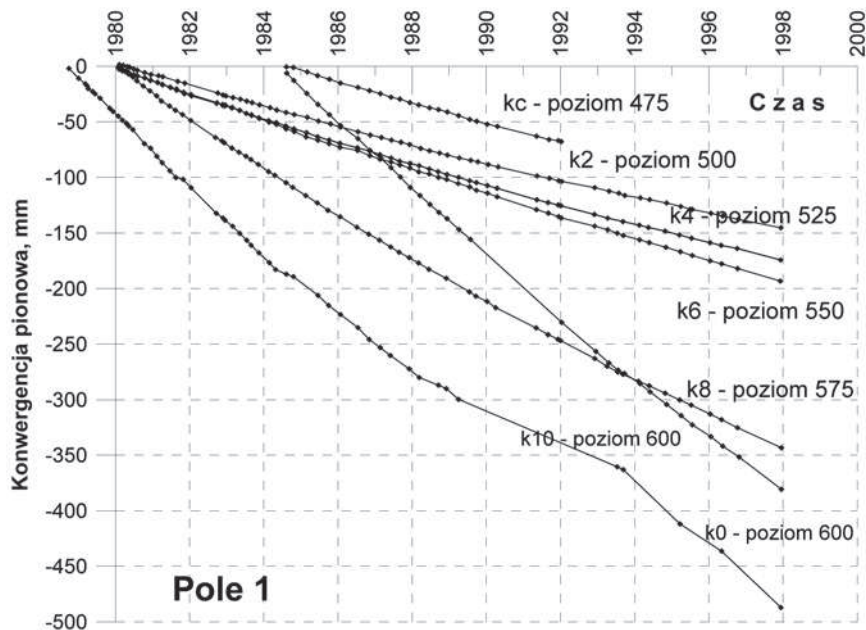
Spękania sygnalizowane mogą być krótkookresowymi zmianami prędkości konwergencji. Przy małej dokładności pomiaru i w odstępach czasu większych niż okres między pojawianiem się kolejnych odkształceń nieciągłych, sygnały te nie są możliwe do zaobserwowania. Często, wobec braku analizy dokładności pomiaru, fluktuacje konwergencji interpretowane są błędnie jako przejaw zmienności ruchu górotworu. Wykonawcy obserwacji nie podają bowiem wartości średnich błędów pomiarów, często większych niż przyrost konwergencji, co prowadzi do nieprawidłowej interpretacji wyników.

Przykładem obserwacji konwergencji w komorach wielopoziomowej komorowo-filarowej eksploatacji są wyniki pomiarów w polu 1 kopalni soli Kłodawa. Prędkość konwergencji na głębokościach od 475 do 600 m jest prawie stała w czasie (rys. 14). Jej zmiany nie są rejestrowane, mimo że wyraźnie widoczny jest postępujący rozwój spękań calizn. Na uwagę zasługuje to, że przeprowadzane w kopalni Kłodawa pomiary emisji akustycznej przez M. Kościuszkę OBR „Chemkop” w latach 80. wykazywały poziom emisji akustycznej proporcjonalny do prędkości konwergencji w poszczególnych komorach.



Rys. 13. Deformacje liniowe calizn w otoczeniu chodnika w kopalni soli Sieroszowice (opracowanie własne)

Fig. 13. Linear deformations of the rock mass body in the vicinity of the gallery in the Sieroszowice Salt Mine (own study)



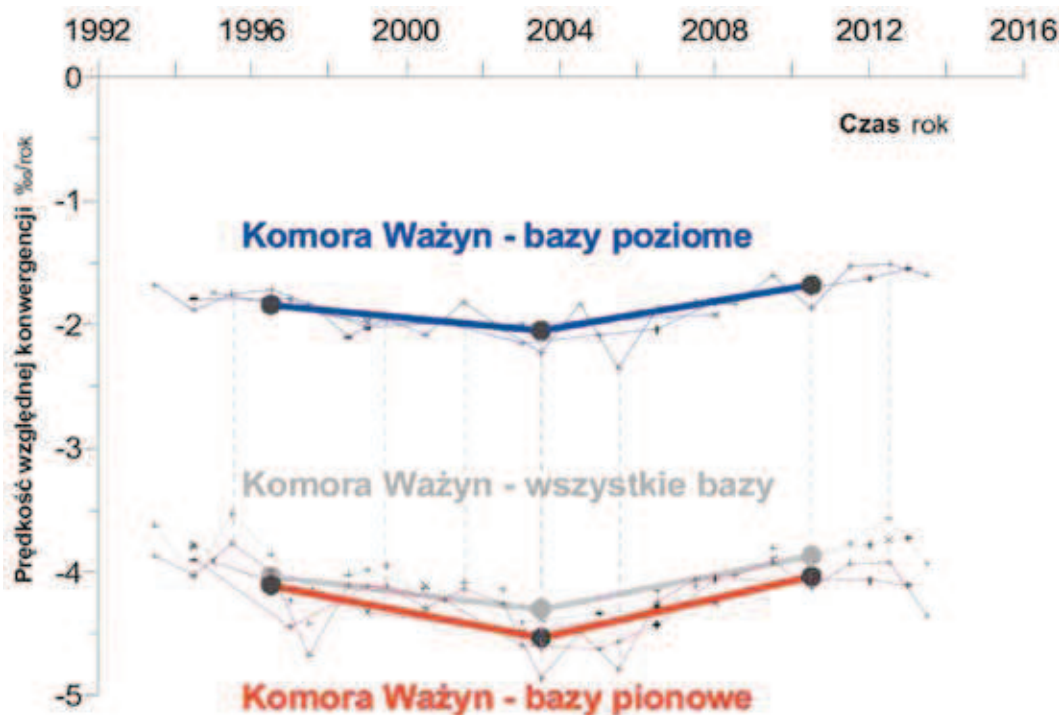
Rys. 14. Konwergencje pionowe w komorach pola 1 w kopalni soli Kłodawa w latach 1980 - 1998, wg [12]

Fig. 14. Vertical convergence in the chambers of Field 1 of the Kłodawa Salt Mine in 1980-1998, according to [12]

Wyliczona analitycznie suma ujemnej prędkości konwergencji powierzchniowej i dodatniej deformacji powierzchniowej filarów w polu 1 kopalni Kłodawa w czasie 30 lat osiągnęła wartość  $-9,8\%$  [13]. Sygnałem powstawania bardzo niebezpiecznych spękań prowadzących do znacznego spadku nośności konstrukcji filarowej pola byłby znaczny i systematyczny wzrost prędkości konwergencji objętościowej, prawdopodobnie w dolnej strefie pola. Sygnałem dostępnym do obserwacji tego procesu powinno być okre-

ślanie prędkości przyrostów poziomych wymiarów filarów pionowych i pionowych wymiarów półtek.

Analiza konwergencji ujawniła tendencje zmian prędkości zaciskania w komorach Kaplicy Św. Kingi i Wążyn w kopalni Bochnia, określone poprzez niezależne obliczenie estymatorów prędkości w okresach 1, 2, 4 i 8-letnich dla wszystkich poziomych i pionowych baz pomiarowych w pracy [23]. Po wprowadzeniu przez Kopalnię w kilkunastu miejscach w kopalni technicznego osuszania powietrza, po 2007 r. pojawiła się tendencja spadku prędkości zaciskania komory (rys. 15).



Rys. 15. Prędkości konwergencji względnej poziomej i pionowej w komorze Wążyn (opracowanie własne)

Fig. 15. Relative horizontal and vertical convergence rates in the Ważyn Chamber (own study)

W komorze Ważyn dominującą w zaciskaniu jest prędkość konwergencji w kierunku pionowym spowodowana wypiętrzaniem spągu, co jest konsekwencją łukowego kształtu przekroju poprzecznego wydłużonej poziomo komory oraz zwiększonej odkształcalności usypiska, sięgającego znacznie w głąb spągu komory. Spękania czy deformacje spągów komór mogą być uciążliwe czy szkodliwe, ale nie generują oczywiście zagrożenia obwał skał.

## 8. Wnioski

1. W naukach górniczych powstawanie i rozwój spękań w skałach bada się w związku z eksploatacją złóż. W kopalniach podziemnych obserwuje się i ocenia związane z tym warunki bezpieczeństwa. Prawidłowa ocena zagrożenia, wynikającego ze spękania skał jest szczególnie ważna w zabytkowych kopalniach soli, ze względu na ich długowieczność i rosnącą intensywność ruchu turystycznego.
2. Miarą zagrożenia jest prawdopodobieństwo utraty użyteczności zagrożonego obiektu. Szkodliwość czy użyteczność zaciskania zależy od funkcji wyrobiska. W zabytkowych komorach zaciskanie jest szkodliwe, ale w strefie podszarych czy wypełnianych zbędnych wyrobisk korzystnie przyspiesza proces ich likwidacji.
3. W wyrobiskach, w których wystąpić może odpadanie skał, zagrożenie dotyczące osób jest proporcjonalne do odpowiedniej sumy czasu ich pobytu. Jest oczywiście mniejsze, jeżeli osoby tylko przechodzą przez takie wyrobiska, niż wtedy, gdy w nich dłużej przebywają.
4. Laboratoryjne badania próbek skał solnych wskazują na związek inicjacji spękań rozdzielczych na progu dylatacji z wytrzymałością długotrwałą, która jest około dwukrotnie mniejsza niż oznaczana laboratoryjne wytrzymałość doraźna.
5. Zagrożenia obwałami skał sygnalizowane jest na ogół: (a) wizualnymi objawami w postaci spękania skał czy wzrostu odspojeń i drobnego opadu skał, (b) deformacją i spękaniami obudowy ze zmniejszeniem jej walorów ochronnych, (c) zmianami prędkości przemieszczeń skał identyfikowanych w pomiarach, (d) występowaniem w caliznach nadmiarowych wyteżeń lub odkształceń, (e) rozwojem szczyln inicjujących odpadanie odspojonych skał, czy obwał skał. Sygnały a i b są identyfikowane w trakcie okresowych przeglądów wyrobisk. Sygnał (c) jest wynikiem analizy danych pomiarowych, sygnał (d) – geomechanicznej analizy obliczeniowej, a sygnał (e) – analizy przemieszczeń lub danych geofizycznych. Dla każdego z tych sygnałów wartościowe rozpoznanie powinno prowadzić do sformułowania miar i kryteriów, określających granice bezpieczeństwa. Kryteria mogą być subiektywne – wynikające z osobistego doświadczenia górnika lub obiektywne – uzyskane z pomiarów i okresowych analiz.
6. Warunkiem bezpieczeństwa jest utrzymywanie w skałach stanu naprężeń mniejszych niż długotrwała wytrzymałość skał, a nie doraźna wytrzymałość próbek skał. Przekroczenie wytrzymałości prowadzi zawsze do pojawienia się spękań, poślizgów, odkształceń, a ich rozwój niekiedy do odspojeń od calizn, odpadania i obwał skał. Zapobiega się temu przez prowadzenie robót górniczych, polegających na ogół na obrywie skał, obudowie, kotwieniu czy przypinaniu siatek ochronnych. W miejscach występowania znacznego zagrożenia osób skuteczność obudowy powinna być obserwowana.
7. Źródłem informacji o stanie geomechanicznym skał w specyficznych warunkach kopalnianych są obserwa-

cje in situ. Ich wyniki powinny służyć monitorowaniu odkształceń górotworu i sygnalizowaniu zagrożeń. W przyszłości obserwacje te powinny być przeprowadzane przede wszystkim wielozadaniowymi inteligentnymi czujnikami ze zmienną częstotliwością rejestracji i zakresem pomiaru oraz z sygnalizacją dostosowaną do wyników pomiarów.

8. Pomiary skierowane na określenie ruchu górotworu, w szczególności pomiary wysokości reperów i konwergencji powinny być wykonywane z częstotliwością zależną od prędkości ruchu i dokładności pomiarów. W warunkach podwyższonego zagrożenia większa częstotliwość pomiarów jest użyteczna, bo sygnalizować może utrzymywanie się dotychczasowej tendencji ruchu. Należy jednak podkreślić, że przy braku analitycznej analizy warunków geomechanicznych stwierdzenie utrzymywania się stałej tendencji ruchu nie może być podstawą uznania, że warunki są bezpieczne.
9. Prognozowanie zaciskania wyrobisk czy deformacji calizn poprzez ekstrapolację wyników obserwacji wymaga zawsze uwzględnienia różnic warunków geologiczno-górnicych. W kopalni Sieroszowice 10% zaciskanie wyrobiska wystąpiło po czasie o rząd wielkości krótszym niż w polu 1 w Kłodawie. Przyczyną tego, oprócz właściwości skał, budowy górotworu i rozmieszczenia wyrobisk jest wzrost obciążeń z głębokością oraz wzrost podatności na pełzanie spowodowany gradientem termicznym i nieliniowym wzrostem prędkości odkształceń z temperaturą.
10. W zabytkowych kopalniach ze wzrostem liczby zwiedzających osób rosnąć powinna odpowiednio obsługa ich bezpieczeństwa, poprzez okresowe przeglądy stanu wyrobisk, pomiary i odpowiedni system ostrzegania z okresową profesjonalną analizą ruchu górotworu. Obserwacja przemieszczeń czy konwergencji nie może jednak zastępować obliczeń i oceny kształtowania się wyteżeń w otoczeniu chronionych wyrobisk.
11. Przeglądy wizualne calizn, pomiary przemieszczeń, konwergencji pustek, deformacji calizn, pomiary geofizyczne i obliczeniowa analiza geomechaniczna, każdy sam w sobie nie jest rozstrzygający dla określania zagrożenia i oceny stanu bezpieczeństwa geomechanicznego. Jest oczywiste, że rozsądne współuczestniczenie tych działań i analiz jest właściwą praktyką, która powinna być stosowana.

## Podziękowania

**Autor składa podziękowanie dr inż. D. Flisiak za cenne uwagi.**

## Literatura

1. Avdeev Y., Vorobyev V., Krainev B., Kublanov A., Semenov Y.: Criteria for geomechanical Stability of Salt Caverns, SMRI, Fall meeting, El Paso, 1997.
2. Carr J. R.: Relation between the fractal dimension and joint roughness, Bull. Assoc. Enginig. Geol. 26, 213-264.
3. Gustkiewicz J., Kortas G., Nowakowski A., Maj A.: Ocena możliwości długotrwałej pracy podziemnego magazynu ropy i paliw w kopalni Góra, OBR Chemkop Kraków/IKS Inowrocław 2003, praca badawcza niepublikowana, 2003.
4. Cotrell A.H.: Własności mechaniczne materii, PWM, Warszawa 1970.
5. Dreyer W.: The science of rock mechanics. Part 1. The strength properties of rocks, Series on Rock and Soil Mechanics, Vol. 1, No. 2, Trans Tech Publications, 1972.
6. Flisiak D.: Laboratoryjne badania właściwości geomechanicznych soli kamiennej z wybranych złóż cechsztyńskich, „Gospodarka Surowcami Mineralnymi” 2008, t. 24, z. 3/2.

7. *Kidybiński A.*: Podstawy geotechniki kopalnianej, Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1982.
8. *Kleczek Z., Flisiak D., Wosz R.*: Czynniki czasu w problematyce stateczności podziemnych wyrobisk górniczych. „Geotechnika i Budownictwo Specjalnym” KGGiG AGH” 1999.
9. *Kortas G.*: O problemie skali w oznaczaniu wytrzymałości skał, Archiwum Górnictwa, t. 25, z. 2, Warszawa - Kraków, praca doktorska, 1980.
10. *Kortas G.*: Konwergencja jako miara zaciskania wyrobisk komorowych, „Przeгляд Górnicy” 2001, Nr 6.
11. *Kortas G.*, (red.): Ruch górotworu i powierzchni w otoczeniu zabytkowych kopalń soli, IMG wyd.IGSiE PAN, Kraków 2004.
12. *Kortas G.* (red.): Ruch górotworu w rejonie wysadów solnych, IMG Wydawnictwo IGSiE PAN, Kraków 2008.
13. *Kortas G.*: On the convergence of workings and the purpose of working observation in salt mine, *Geology, Geophysics & Environment* 2012, Vol. 38, No. 1, 51-68, 2012.
14. *Kortas G.*: Long- and Short-Term Process Indicated by the Displacement of the Chamber Roof in the Monumental Wieliczka Salt Mine, *Archives of Mining Sciences*, Committee of Mining, Kraków, 2013.
15. *Kortas G.*: Podstawowe problemy ochrony powierzchni i górotworu w górnictwie solnym, „Przeгляд Górnicy” 2014, Nr 10.
16. *Kortas G., Maj A.*: Estimation of stresses around underground petroleum storage in hardly recognized geological and mining conditions in salt dome, *A.A.Balkema Publishers, ISRM Eurock*, pp.269-274, 2005.
17. *Kortas G., Maj A.*: Warunki geomechaniczne w caliznach chroniących kopalnię przed wodami na przykładzie kopalni soli Kłodawa, „Przeгляд Górnicy” 2012, Nr 12.
18. *Kortas G., Maj A.*: Aktualny stan bezpieczeństwa wyrobisk trasy turystycznej w zakładzie górniczym Bochnia, praca badawcza niepublikowana, *GeoConsulting Sc. KS Bochnia* 2014.
19. *Kortas G., Nowakowski A.*: Krytycznie o zjawiskach pokrywicznych w próbkach skalnych „Geotechnika i Budownictwo Specjalne” 2002, z. 25.
20. *Kwaśniewski M.*: 1996 Dylatacja jako zwiastun zniszczenia skały, „Przeгляд Górnicy” 1992, Nr 6.
21. *Kwaśniewski M.*: O naturze pustek w skałach, procesie mikropęknięcia i odkształceniach objętościowych poprzedzających kruche zniszczenia w polu naprężeń ściskających, *III Szkoła Geofizyki Górniczej, Wadowice* 1992.
22. *Maj A.*: Convergence of gallery workings in underground salt mines, *Archives of Mining Sciences* 2012. No. 14, monografia, 2012.
23. *Maj A., Kortas G.*: Ocena skuteczności podszadzenia wyrobisk K.S. Bochnia w kontekście ochrony powierzchni i podziemnych obiektów zabytkowych, *GeoConsulting Kraków/KS Bochnia* 2014, praca badawcza niepublikowana, 2014.
24. *Marcał H.*: Fizyczne podstawy użycia metod geofizycznych, „Gospodarka Surowcami Mineralnymi” 2008, t.24, z. 2/3.
25. *Norton F. H.*: The creep of steel at high temperatures, *McGraw-Hill, New York*, 1929.
26. *Szewczyk J. i in.*: Wykonanie analizy wraz z interpretacją wyników pomiarów konwergencji pionowej i poziomej oraz propagacji szczelin w wyrobiskach, praca badawcza niepublikowana, *KS Wieliczka* 2011.
27. *Jaeger J.C., Cook N.G., Zimmerman R.W.*: *Fundamentals of Rock Mechanics*, 4th. edition, *Blackwell Publishing USA*, pp. 70, 2007.
28. *Wawersik W. R., Fairhurst C.*: A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.*, Vol. 7, pp. 561 – 575, 1970.