

**AKADEMIA GÓRNICZO - HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

**WYDZIAŁ GEODEZJI GÓRNICZEJ I INŻYNIERII ŚRODOWISKA**

**KATEDRA OCHRONY TERENÓW GÓRNICZYCH,  
GEOINFORMATYKI I GEODEZJI GÓRNICZEJ**

**ROZPRAWA DOKTORSKA**

**OPRACOWANIE MODELU KONWERCENCJI WYROBISK  
W PODZIEMNYCH KOPALNIACH SOLI**

**AGNIESZKA MAJ**

**PROMOTOR: DR HAB. INŻ. GRZEGORZ KORTAS**

**KRAKÓW 2009**

*Serdecznie dziękuję*  
*Panu Dr hab. inż. Grzegorzowi Kortasowi*  
*za pomoc w realizacji pracy badawczej*  
*i cenne uwagi w trakcie pisania rozprawy*

*Składam podziękowania za udostępnienie materiałów  
Mierniczym Górniczym polskich podziemnych kopalń soli:*

*Pani Jolancie Marcoli-Sadowskiej,*

*Panu Władysławowi Ciagle,*

*Panu Leszkowi Józefce,*

*Panu Zbigniewowi Stawarczykowi,*

*a także Wykonawcom pomiarów konwergencji:*

*Panu Józefowi Bieniaszowi*

*i Panu Waldemarowi Wojnarowi*

*oraz Pani Danucie Flisiak  
za udostępnienie wyników testów laboratoryjnych*

# Spis treści

<b>WSTĘP</b> .....	<b>6</b>
<b>1. TEZY, CEL I ZAKRES PRACY</b> .....	<b>8</b>
1.1. TEZY PRACY .....	8
1.2. CEL I ZAKRES PRACY .....	8
<b>2. PODSTAWOWE POJĘCIA</b> .....	<b>11</b>
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ .....	17
<b>3. TECHNIKA POMIARU KONWERCENCJI</b> .....	<b>18</b>
3.1. METODY POMIARU KONWERCENCJI.....	18
3.2. STACJE POMIAROWE .....	21
3.3. PRZYRZĄDY POMIAROWE .....	25
3.4. DOKŁADNOŚĆ POMIARU KONWERCENCJI.....	30
3.5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI .....	34
<b>4. WYNIKI POMIARÓW KONWERCENCJI I ICH INTERPRETACJA OPISOWA</b> .....	<b>35</b>
4.1. CHARAKTERYSTYKA POLSKICH KOPALŃ SOLI.....	35
4.2. POMIARY KONWERCENCJI W POLSKICH KOPALNIACH SOLI .....	36
4.3. OMÓWIENIE WYNIKÓW POMIARÓW KONWERCENCJI.....	40
4.4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI .....	51
<b>5. ZACHOWANIE SIĘ GÓROTWORU SOLNEGO – STAN WIEDZY</b> .....	<b>52</b>
5.1. ZACHOWANIE SIĘ SOLI KAMIENNEJ NA PODSTAWIE TESTÓW LABORATORYJNYCH I BADAŃ <i>IN-SITU</i> ....	52
5.2. MODELE FIZYCZNE STOSOWANE W GEOMECHANICE SOLNEJ.....	57
5.3. MODELOWANIE ZACHOWANIA SIĘ GÓROTWORU POD WPŁYWEM DZIAŁALNOŚCI GÓRNICZEJ .....	60
5.4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI .....	61
<b>6. MODEL KONWERCENCJI WYROBISKA CHODNIKOWEGO W GÓROTWORZE SOLNYM</b> .....	<b>62</b>
6.1. OPIS MODELU .....	62
6.2. ZAKRES WARTOŚCI PARAMETRÓW MODELU .....	66
6.3. SPOSÓB OPRACOWANIA WYNIKÓW SYMULACJI NUMERYCZNYCH .....	68
6.4. PODSUMOWANIE.....	69

<b>7. ZASTOSOWANIE MODELU KONWERCENCJI .....</b>	<b>70</b>
7.1. OKREŚLENIE ZALEŻNOŚCI CHARAKTERYZUJĄCYCH ZJAWISKO ZACISKANIA WYROBISKA .....	70
7.1.1. Reguła kształtu .....	70
7.1.2. Wpływ smukłości na konwergencję natychmiastową i w trakcie pełzania .....	73
7.1.3. Wpływ modułu Younga na konwergencję natychmiastową i w trakcie pełzania .....	76
7.1.4. Wpływ czasu na konwergencję powierzchniową .....	78
7.1.5. Naprężenia i odkształcenia w sąsiedztwie wyrobisk na różnych głębokościach .....	83
7.1.6. Wpływ głębokości na konwergencję .....	85
7.2. OKREŚLENIE WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNYCH GÓROTWORU W KOPALNI SIEROSZOWICE .....	87
7.2.1. Opis sytuacji górniczej .....	87
7.2.2. Wyniki pomiarów konwergencji .....	88
7.2.3. Analiza zachowania się górotworu .....	90
7.3. PODSUMOWANIE I WNIOSKI .....	93
<b>8. POSZERZONY MODEL KONWERCENCJI Z UWZGLĘDNIENIEM INNYCH CZYNNIKÓW GEOLOGICZNO-GÓRNICZYCH .....</b>	<b>94</b>
8.1. PODZIAŁ CZYNNIKÓW WPŁYWAJĄCYCH NA KONWERCENCJĘ .....	94
8.2. WPŁYW ZMIENNEJ GEOMETRII WYROBISK .....	96
8.2.1. Opis modelu 3D+t .....	96
8.2.2. Warianty drażenia chodników .....	97
8.2.3. Opis wyników .....	99
8.3. WPŁYW ZMIENNYCH WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNYCH GÓROTWORU I WYPEŁNIENIA WYROBISKA .....	103
8.3.1. Temperatura i wilgotność .....	104
8.3.2. Uwarstwienie górotworu .....	106
8.3.3. Wypełnienie wyrobiska .....	107
8.4. PODSUMOWANIE .....	108
<b>9. ZALECENIA DOTYCZĄCE PROJEKTOWANIA POMIARÓW KONWERCENCJI I ANALIZY ICH WYNIKÓW .....</b>	<b>109</b>
<b>10. PODSUMOWANIE I WNIOSKI .....</b>	<b>111</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>114</b>
<b>DOROBEK NAUKOWY I ZAWODOWY .....</b>	<b>121</b>

# Wstęp

Konwergencja jest wielkością charakteryzującą zaciskanie wyrobisk. Pomiar konwergencji przeprowadzane są obecnie we wszystkich kopalniach soli w Polsce. Ilość zakładanych stacji pomiarowych znacząco wzrosła po katastrofalnym zatopieniu kopalni soli w Wapnie w 1977 r. Pomiar konwergencji służy rozpoznaniu zachowania się górotworu i niekiedy ocenie bezpieczeństwa geomechanicznego.

Górnictwo solne w minionych latach ograniczało się do pozyskiwania surowca. Obecnie, wraz z przeobrażeniami w gospodarce, pojawiło się zainteresowanie niegórnictwem wykorzystaniem przestrzeni, jaką tworzą wyrobiska w kopalniach soli. Rozwija się turystyka kopalniana, działalność sanatoryjna, magazynowanie węglowodorów ciekłych i gazowych oraz składowanie odpadów, w tym najbardziej niebezpiecznych dla środowiska. Wyrobiska w kopalniach soli służą także jako hale wystawowe, kaplice, centra konferencyjne i sportowe czy magazyny towarów.

Sól wydobywana jest w Polsce z wysadów solnych Kłodawa, Góra i Mogilno oraz złoża pokładowego w Sieroszowicach\*. Turystyka górnicza rozwija się w zabytkowych kopalniach Wieliczka i Bochnia, a także w kopalni Kłodawa. W magazynach gazu ziemnego w złożu Mogilno i w przyszłości w Kosakowie oraz w magazynie ropy i paliw w Górze tworzone są rezerwy paliwowe kraju. W przyszłości przewidywane jest utworzenie składowiska odpadów niebezpiecznych w nowej kopalni soli.

Wyrobiska solne ulegają zaciskaniu, które może negatywnie zmieniać funkcjonalność kopalni lub być zjawiskiem korzystnym przy składowaniu niebezpiecznych odpadów. Szybkość zaciskania charakteryzuje właściwości i stan górotworu. Stąd potrzeba pomiarów, analiz i przewidywania zaciskania wyrobisk górniczych.

Wyniki pomiarów konwergencji dokumentowane w sprawozdaniach z przeprowadzonych obserwacji rzadko przedstawiane są w publikacjach. Także brak jest odrębnych studiów poświęconych konwergencji, które służyłyby szerszemu przedstawieniu

---

\* Legnicko-Głogowski Okręg Miedziowy

wyników w polskich kopalniach soli i ich ogólniejszej analizie. Celem tej pracy jest próba kompleksowego przedstawienia sposobów pomiaru i interpretacji uzyskanych wyników oraz fizycznego opisu zjawiska zaciskania w specyficznym górotworze solnym, wykazującym właściwości reologiczne. Ze względu na obszerny zakres problematyki ujętej w temacie zasadnicze studia skierowane zostały w tej pracy na zachowanie się najprostszego obiektu górniczego, jakim jest wyrobisko chodnikowe. Tworzy to podstawę do dalszych badań nad zachowaniem wyrobisk o złożonym kształcie, zespołu wyrobisk czy wielopoziomowych kopalń soli.

Nowatorstwo podjętych badań polega na tym, że do analizy zjawiska zaciskania wyrobiska górniczego, jak również projektowania geodezyjnych pomiarów konwergencji, interpretacji ich wyników oraz określenia właściwości górotworu w kopalniach soli wykorzystano model fizyczny ośrodka sprężysto-lepkiego.

# 1. Tezy, cel i zakres pracy

## 1.1. Tezy pracy

- 1 Prawa fizyczne opisujące ośrodek sprężysto-lepki z potęgowym prawem pełzania Nortona służyć mogą do opisu konwergencji w kopalniach soli
- 2 Model konwergencji, sformułowany w tej pracy, ujawnia istotne zależności charakteryzujące zaciskanie wyrobisk i sposób ich wyznaczania na drodze pomiarów
- 3 Wyniki pomiarów konwergencji z wykorzystaniem modelu konwergencji prowadzą do określenia reologicznych właściwości górotworu solnego

## 1.2. Cel i zakres pracy

Pierwsza część pracy miała na celu kompleksowe przedstawienie stosowanych metod pomiarów konwergencji i wykorzystywanych w pomiarach przyrządów. Opisano warunki, cele pomiarów i uzyskiwane wartości konwergencji w polskich podziemnych kopalniach soli. Uwzględniając stan wiedzy, wskazano na potrzebę opracowania modelu konwergencji z wykorzystaniem fizycznego modelu ośrodka solnego.

Celem drugiej części prac było sformułowanie modelu konwergencji oraz wyłonienie zależności pomiędzy konwergencją a parametrami geometrycznymi i fizycznymi modelu a także wyznaczenie parametrów geomechanicznych górotworu solnego metodą analizy odwrotnej w oparciu o wyniki geodezyjnych pomiarów konwergencji. Ta część pracy obejmowała przeprowadzenie wielu setek symulacji zaciskania wyrobiska programem Cosmos/M dla numerycznych obliczeń z wykorzystaniem metody elementów skończonych.

Temat pracy, studia publikacji i dokumentacji z przeprowadzonych pomiarów konwergencji w wyrobiskach chodnikowych, komorowych i ich zespołach, stanowiły podstawę do określenia zakresu podjętych w tej pracy analiz. Przedmiotem badań było zachowanie się górotworu, w którym najpierw wytworzony został hydrostatyczny stan naprężeń pierwotnych. Utworzenie wyrobiska powoduje zmianę tego stanu, obserwowaną w pomiarach geodezyjnych jako proces odkształcania górotworu i zaciskania tego wyrobiska.

Podstawowe studia skierowano na odosobniony chodnik o przekroju prostokąta w jednorodnym górotworze. Zakres obliczeń numerycznych obejmował analizę statycznych, ciągłych deformacji górotworu, z wyłonieniem zachowań natychmiastowych i pełzania. Model konwergencji, opisany w przestrzeni dwuwymiarowej (2D+t), rozszerzono do przestrzeni 3D+t, w celu pokazania wpływu postępu drażenia chodnika oraz sąsiedztwa innych wyrobisk na zaciskanie chodnika. Sklasyfikowano i przedstawiono także wpływy szeregu czynników geologiczno – górniczych na konwergencję jako podmiot pomiarów i analiz geomechanicznych.

Praca składa się z następujących rozdziałów:

Wstęp

1) *Tezy, cel i zakres pracy*

2) *Podstawowe pojęcia,*

w którym zdefiniowano pojęcia, wielkości i terminy używane w pracy

3) *Technika pomiaru konwergencji,*

w którym opisano metody pomiaru konwergencji, ze szczególnym uwzględnieniem pomiarów geodezyjnych, sklasyfikowano zakładane w kopalniach soli stacje pomiarowe, przedstawiono przyrządy stosowane do pomiarów konwergencji oraz oszacowano dokładność pomiaru konwergencji

4) *Wyniki pomiarów konwergencji i ich interpretacja opisowa,*

w którym przedstawiono sposoby dotychczasowych interpretacji wyników pomiarów konwergencji w polskich kopalniach soli i wskazano na konieczność oparcia interpretacji na modelu ośrodka fizycznego

5) *Zachowanie się górotworu solnego – stan wiedzy,*

w którym przedstawiono obecny stan wiedzy uzyskany z eksperymentów laboratoryjnych i pomiarów *in-situ* w górotworze solnym oraz stosowane modele geomechaniczne

6) *Model konwergencji wyrobiska chodnikowego w górotworze solnym,*

w którym opisano przyjęty model konwergencji, jego założenia fizyczne i geometryczne oraz stosowany sposób przetwarzania wyników symulacji numerycznych

7) *Zastosowania modelu konwergencji,*

w którym pokazano zależności charakteryzujące zaciskanie wyrobisk w formie prostych związków funkcyjnych oraz zastosowanie modelu do określenia właściwości reologicznych górotworu

- 8) *Poszerzony model konwergencji z uwzględnieniem innych czynników geologiczno-górnictwowych,*  
w którym pokazano ograniczenia modelu konwergencji, ale także sposoby uwzględniania w nim różnorodnych czynników geologiczno-górnictwowych
- 9) *Zalecenia dotyczące projektowania pomiarów konwergencji i analizy ich wyników,*  
w którym podano kilka uwag dotyczących projektowania stacji, wykonywania pomiarów i interpretacji ich wyników
- 10) *Podsumowanie i wnioski*

Poza powyższymi rozdziałami podano także bibliografię i spis treści.

## 2. Podstawowe pojęcia

Prowadzenie robót górniczych narusza pierwotną równowagę górotworu. Powoduje wytworzenie nowego stanu naprężenia w otaczającym je górotworze, zależnego od pierwotnego stanu naprężenia i geomechanicznych właściwości górotworu, od kształtu i rozmiarów wyrobiska oraz jego położenia w stosunku do innych wyrobisk. Przejście do nowego stanu równowagi przejawia się przemieszczaniem elementów górotworu z położenia pierwotnego do wtórnego, zwykle do wewnątrz wyrobiska. Ten ruch górotworu nazwa się zaciskaniem wyrobiska.

Zaciskanie jest zjawiskiem, ale także procesem, czyli przebiegiem następujących po sobie i powiązanych przyczynowo zmian. Konwergencja jest wielkością charakteryzującą zaciskanie wyrobiska, czyli właściwością tego zjawiska, którą można zmierzyć. W wielu publikacjach konwergencja jest utożsamiana z zaciskaniem [Kunstman i in. 2002, Bieniasz i in. 2003b, Hejmanowski 2004, Majcherczyk i in. 2006] i często spotkać można sformułowania „zjawisko konwergencji” lub „pomiar zaciskania”. W języku angielskim obok pojęcia „convergence” [np. Jeremic 1994] funkcjonuje pojęcie „room closure” [np. Baar 1977], bardzo częste w publikacjach amerykańskich, z tym, że „closure” odnosi się tak do zjawiska, jak i wielkości je charakteryzującej.

**Zjawisko zaciskania** wyrobiska w górotworze solnym przebiega na ogół w bardzo długim okresie czasu, co jest wynikiem reologicznych właściwości soli. Płynięcie soli pod wpływem naprężenia, przejawia się wzrostem odkształceń w czasie. Charakterystyczną cechą zaciskania niewyętego górotworu jest zachowanie spójności i ciągłości odkształcania w czasie. Przekroczenie granicy wytrzymałości powoduje utratę spójności górotworu i prowadzi do obwałów. Po takim zdarzeniu na ogół kontynuowane jest zaciskanie w nowych warunkach. Przejawem zjawiska zaciskania jest wykształcanie się charakterystycznych krzywizn konturu wyrobiska w kształcie „poduszki” (rys. 2.1), ale także:

- połamane belki obudowy;
- sprasowany materiał skalny z obwałów;
- belki kasztów „oblane górotworem”;
- wypchnięte lub wybrzuszone ścianki zamykające wejścia do komór.

Zaciskanie powoduje konieczność przybierek stropu, spągu i ociosów.

W tej pracy termin „zaciskanie” dotyczyć będzie niewyętego górotworu i zachowania warunku spójności i ciągłości, czyli z pominięciem deformacji nieciągłych.



Rys. 2.1. Pomiar konwergencji w Kaplicy Św. Kingi w Bochni;  
charakterystyczny kształt zaciskanego wyrobiska solnego (fot. A. Maj)

Fizyczną przyczyną zaciskania wyrobisk jest oddziaływanie siły ciężkości. Ważnymi czynnikami wpływającymi na proces zaciskania wyrobisk w górotworze solnym jest temperatura i wilgotność. O jego rozwoju decyduje:

- budowa geologiczna górotworu i warunki hydrogeologiczne,
- pierwotny stan naprężenia,
- głębokość wyrobiska,
- usytuowanie wyrobiska w polu eksploatacyjnym,
- wymiary wyrobiska,
- sposób prowadzenia robót górniczych
- rodzaj stosowanej obudowy

ale przede wszystkim właściwości skał.

Mierzalną cechą zaciskania jest **konwergencja**. Termin *konwergencja* oznacza w języku polskim „zbieżność” i wykorzystywany jest w wielu dziedzinach, jak np. w biologii, medycynie, teleinformatyce, etnografii czy ekonomii. Pochodzi od łacińskiego słowa *convergere*, znaczącego „zbiegać się”. Poprzez angielskie i francuskie słowo *convergence*

dotarło do Polski i pojęcie *konwergencja* przyjęło się w naszym języku. W górnictwie pojęcie to dobrze określa proces zaciskania, czyli „zbiegania się” ociosów oraz spągu ze stropem wyrobiska. Stąd też czasami termin *konwergencja* zastępuje się terminem *zbieżność*.

Wyrobisko górnicze jest obiektem trójwymiarowym. Konwergencja wyrażająca jego zaciskanie powinna być wyrażona w jednostkach objętości, czyli np. w metrach sześciennych. Zwykle jednak konwergencję kojarzy się z ujemnym przyrostem odległości między ścianami wyrobiska, co przekłada się na wyrażanie konwergencji w jednostkach liniowych, np. w milimetrach. Wynika to głównie z tradycyjnego sposobu pomiaru konwergencji. W kopalniach otworowych, wydobywających sól metodą ługowania, najbardziej naturalną jednostką konwergencji jest właśnie metr sześcienny. Okresowo mierząc powierzchnię przekrojów poziomych kaverny obserwuje się także proces zaciskania. Do jego opisu używa się wtedy jednostek powierzchniowych, np. metrów kwadratowych.

Konwergencja wyrażona w jednostkach długości, pola powierzchni lub objętości jest konwergencją bezwzględną  $k$ . Dzieląc ją przez wymiar wyrobiska (liniowy, powierzchniowy lub przestrzenny) otrzymuje się konwergencję względną  $\xi$ , wyrażaną w promilach. Prędkość konwergencji względnej  $\dot{\xi}$  ( $\xi'$ ) to wartość konwergencji względnej podzielona przez czas, wyrażana jest w promilach na rok. Prędkość konwergencji liniowej bezwzględnej  $\dot{k}$  wyrażana jest na ogół w milimetrach na rok.

Określając konwergencje liniowe wyrobiska o regularnych kształtach wyróżnia się konwergencje główne – mierzone wzdłuż kierunków poprowadzonych przez środek wyrobiska prostopadle do jego ociosów lub spągu i stropu (rys. 2.2). Szczególną formą wyrobiska jest poziomy chodnik o przekroju prostokątnym. W takim wyrobisku konwergencja powierzchniowa, określa zmniejszanie się pola powierzchni przekroju poprzecznego.

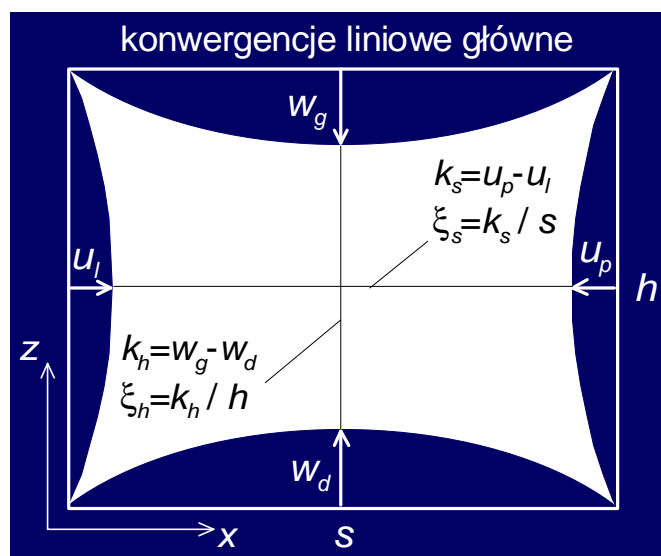
Konwergencję objętościową definiuje się strumieniem pola wektorowego przemieszczenia  $U$  o współrzędnych  $u, v, w$  przechodzącego przez powierzchnię skierowaną  $\Omega$  zgodnie ze wzorem [Kortas 2008]:

$$k_v = \oiint_{\Omega} U d\Omega = \iint_{\Omega_{yz}} u dydz + \iint_{\Omega_{zx}} v dzdx + \iint_{\Omega_{xy}} w dx dy. \quad (2.1)$$

W przestrzeni dwuwymiarowej definicję konwergencji powierzchniowej zapisać można formułą:

$$k_p = \oint_{\Lambda} U d\Lambda = \int_{\Lambda_z} u dz + \int_{\Lambda_x} w dx. \quad (2.2)$$

W symulacjach komputerowych wybranie złoza odwzorowywane jest przez usunięcie elementów. Wtedy wyróżnić można pojawiającą się w chwili usunięcia elementów konwergencję natychmiastową i zmieniającą się w czasie konwergencję w fazie pełzania górotworu. W warunkach *in-situ* na ogół nie obserwuje się procesów natychmiastowych.



Rys. 2.2. Konwergencje liniowe główne

Zaciskanie wyrobiska zawsze zmniejsza jego objętość, dlatego konwergencja jest podawana w wartościach ujemnych, jednak ze względów praktycznych często pomijany jest znak „-”, a przedstawiana wtedy wartość jest wartością bezwzględną (modułem) konwergencji. W następnych rozdziałach wartości konwergencji podawano z zachowaniem znaku ujemnego, ale wzrost konwergencji oznacza wzrost jej modułu.

**Wyrobisko** to pusta przestrzeń powstała w górotworze wskutek wybrania złoza. Wyróżnia się wyrobiska chodnikowe i komorowe. Komora jest wyrobiskiem eksploatacyjnym, chodnik może być wyrobiskiem udostępniającym lub przygotowawczym, może być też wyrobiskiem eksploatacyjnym. W tej pracy chodnikiem jest wyrobisko poziome o jednym, dominującym wymiarze w kierunku poziomym, którego przekroje poprzeczne są prostokątami o stałych wymiarach.

**Modelem** nazywa się hipotetyczną konstrukcję myślową obejmującą układ przyjętych założeń i ich skutków, służącą uchwyceniu najistotniejszych cech i zależności występujących w procesie opisywanym przez ten model. Modele matematyczne mogą opisywać w uproszczeniu zjawiska fizyczne, a wśród nich także zjawisko zaciskania chodnika. Wtedy konstrukcję taką nazwać można modelem konwergencji chodnika.

Modele budowane są, aby opisać złożone zjawiska. Celem modelowania jest w szczególności poszukiwanie związków między czynnikami, parametrami zjawiska, elementami czy wielkościami fizycznymi a opisywanym przez model procesem, którego dostępnym do pomiaru przejawem są na przykład przemieszczenia oraz interpretacja wyników obserwacji i przewidywanie skutków modelowanego procesu. Wyniki modelowania służą mogą określieniu sposobów właściwego przeprowadzenia obserwacji.

Modele złożonych zjawisk fizycznych w górotworze zawierają:

- model geometryczny – czyli geometryczne odwzorowanie przestrzeni, w jakiej zjawisko występuje,
- model fizyczny dotyczący istotnych oddziaływań fizycznych w badanym procesie,
- model matematyczny wyrażający związki funkcyjne między zmiennymi procesu,
- model obliczeniowy służący wyznaczeniu wartości zmiennych procesu.

W zależności od znanych z obserwacji zachowań górotworu i przeprowadzonych eksperymentów dokonuje się wyboru praw fizycznych opisujących właściwości górotworu, na przykład pełzanie. Prawa fizyczne przedstawia się w postaci praw konstytutywnych, zawierających zależność tensora odkształcenia od tensora naprężenia lub ich pochodnych względem czasu. Jeżeli ścisłe obliczenia są zbyt trudne lub niemożliwe do wykonania, stosuje się numeryczne (przybliżone) sposoby obliczeń. Wtedy górotwór odwzorowywany jest przez ośrodek ciągły (kontinuum). Zastępowanie kontinuum o nieskończonej liczbie stopni swobody zbiorem elementów o skończonej liczbie stopni swobody nazywa się dyskretyzacją kontinuum.

Mechanika górotworu wykorzystuje kilka metod obliczeń opierających się na dyskretyzacji kontinuum. Najczęściej stosowanymi są metody: elementów skończonych, elementów brzegowych, różnic skończonych czy elementów dyskretnych. W **metodzie elementów skończonych** (MES), opisanej szczegółowo w pracy Zienkiewicza [Zienkiewicz 1972]. Dyskretyzację modelu geometrycznego rozpoczyna się od podziału kontinuum na założoną liczbę elementów. Elementy te są z założenia połączone w skończonej liczbie punktów o określonej liczbie stopni swobody, zwanych węzłami. Przemieszczenia węzłów stanowią podstawowy układ niewiadomych (metoda przemieszczeń). Stan przemieszczenia wewnątrz i na brzegach elementu definiują przemieszczenia węzłów oraz tzw. funkcja kształtu elementu. Stan odkształcenia poprzez warunki nierozdzielności powiązany jest ze stanem przemieszczenia. Stan naprężenia wewnątrz i na brzegach elementu skończonego wiązany jest ze stanem odkształcenia poprzez założone prawo konstytutywne. Określany jest układ sił węzłowych równoważnych wszystkim obciążeniom elementu i formułowane

równanie równowagi elementu poprzez związek pomiędzy siłami węzłowymi a przemieszczeniami węzłów. Z równań równowagi pojedynczych elementów otrzymuje się równanie równowagi całego kontinuum. Wynikiem rozwiązania równania równowagi są wartości przemieszczeń węzłów. Na ich podstawie oblicza się wartości odkształceń i naprężeń [Walaszczyk 1989].

Sformułowanie równania równowagi i jego rozwiązanie dokonuje się w systemach obliczeniowych takich, jak Cosmos/M, Abaqus, Flac, automatycznie na podstawie przyjętych w preprocesorze założeń. **Cosmos/M** jest systemem analizy konstrukcji wykorzystującym metodę elementów skończonych. Preprocesor modułu GEOSTAR, zarządzający całym systemem, umożliwia [Konderla, Kasprzak 1997]:

- zbudowanie modelu geometrycznego,
- wskazanie praw konstytutywnych,
- dyskretyzację,
- określenie warunków brzegowych,
- określenie zakresu analizy.

Moduł obliczeniowy umożliwia przeprowadzenie analizy m. in. w zakresie statyki liniowej (STAR) i nieliniowej (NSTAR), która jest szczególnie istotna przy rozwiązywaniu zagadnień zachowania górotworu solnego. Postprocesor pozwala na wizualizację wyników analizy i ich zapis w plikach tekstowych.

## Wykaz ważniejszych oznaczeń:

$k_s, k_h$	konwergencja liniowa pozioma [mm], pionowa [mm]
$k_p, k_v$	konwergencja powierzchniowa [m <sup>2</sup> ], objętościowa [m <sup>3</sup> ]
$\xi_s, \xi_h$	konwergencja względna liniowa pozioma [‰], pionowa [‰]
$\xi_p, \xi_v$	konwergencja względna powierzchniowa [‰], objętościowa [‰]
$d\xi/dt = \dot{\xi} = \xi'$	prędkość względnej konwergencji [‰/rok]
$s, h$	wymiary chodnika [m]
$\lambda = h / s$	smukłość chodnika [-]
$H$	głębokość [m]
$u, v, w$	przemieszczenia [mm]
$t$	czas [s], [d], [rok]
$g$	przyspieszenie ziemskie [m/s <sup>2</sup> ]
$\rho$	gęstość objętościowa [kg/m <sup>3</sup> ]
$\gamma$	ciężar objętościowy [N/m <sup>3</sup> ]
$E, \nu$	moduł Younga [GPa], liczba Poissona [-]
$A, B, n, m$	parametry prawa pełzania Nortona [Pa <sup>-n</sup> s <sup>-m</sup> ], [Pa <sup>-n</sup> s <sup>-m</sup> ], [-], [-]
$Q$	energia aktywacji w procesie pełzania [cal*K/mol]
$R, T$	stała gazowa [cal/mol], temperatura [K], [°C]
${}^D\sigma_{ij}$	dewiator naprężenia: ${}^D\sigma_{ij} = \sigma_{ij} - {}^A\sigma_m \delta_{ij}$
${}^D\varepsilon_{ij}$	dewiator odkształcenia: ${}^D\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij} - {}^A\varepsilon_m \delta_{ij}$
${}^A\sigma_m$	naprężenie średnie: ${}^A\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ ,
${}^A\varepsilon_m$	odkształcenie średnie: ${}^A\varepsilon_m = \frac{1}{3}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)$ ,
$\delta_{ij}$	symbol Kroneckera,
$\sigma_e$	naprężenie efektywne: $\sigma_e = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)}$
$\varepsilon_e$	odkształcenie efektywne: $\varepsilon_e = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + \frac{3}{2}(\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{23}^2 + \varepsilon_{31}^2)}$
$p$	naprężenie pierwotne [MPa]
$C, c$	stałe

### **3. Technika pomiaru konwergencji**

Formułowanie modelu konwergencji wymaga najpierw przedstawienia sposobów pomiarów konwergencji stosowanych w praktyce górniczej. W tym rozdziale omawia się geodezyjne i niegeodezyjne metody pomiaru konwergencji. Szczególną uwagę zwraca się na najbardziej powszechny sposób pomiaru konwergencji oparty na prostym pomiarze zmiennej w czasie długości baz pomiarowych w wyrobiskach podziemnych kopalń soli. Bazy takie tworzą stacje pomiarowe zakładane w chodnikach i w wyrobiskach komorowych. Lokalizacja i konstrukcja stacji pomiarowej wynika z warunków geologiczno-górnicych i celu, jakemu służyć ma obserwacja. Do pomiaru konwergencji używa się specjalnie skonstruowanych urządzeń, a także szeregu prostych i bardziej złożonych przyrządów i instrumentów geodezyjnych. W tym rozdziale przedstawiono także przykład analizy dokładności pomiaru konwergencji prowadzonego przez autorkę od 2004 r. w kopalni kłodawskiej.

#### **3.1. Metody pomiaru konwergencji**

W badaniach zaciskania wyrobisk najczęściej stosowany jest wielokrotny pomiar długości odcinka – bazy między punktami zastabilizowanymi na konturze wyrobiska. Kolejne pomiary wykonywane są w zależności od założonej częstotliwości. Konwergencję liniową w odstępie czasu między obserwacjami uzyskiwana jest przez odjęcie następnego wyniku pomiaru długości odcinka od poprzedniego.

Jest wiele innych rodzajów obserwacji procesu zaciskania wyrobiska. Ogólnie ujmując sposoby pomiaru konwergencji można podzielić na metody geodezyjne i niegeodezyjne. Metody geodezyjne są najczęściej stosowanymi w polskich kopalniach soli i jedynymi, jakie prowadzi się w kopalniach podziemnych. Polegają one na bezpośrednim i pośrednim pomiarze konwergencji, tj:

- bezpośrednim pomiarze konwergencji liniowej przez obserwację różnic przemieszczeń;
- pośrednim pomiarze konwergencji liniowej przez pomiar długości baz (rys. 3.1),
- pośrednim fotogrametrycznym lub skanerowym pomiarze konwergencji powierzchniowej lub objętościowej przez określanie położenia punktów na ścianach wyrobiska.



Rys. 3.1. Pośredni pomiar konwergencji liniowej przez pomiar długości baz [www.budokop.pl]

Najbardziej rozpowszechnionymi są pośrednie pomiary długości baz. Taką metodą określano konwergencję w kopalniach w Wieliczce i w innych podziemnych polskich kopalniach soli. Sposoby przeprowadzenia takiego pomiaru oraz stosowane do tego urządzenia omawia się w rozdz. 3.3.

Z różnorodności urządzeń do bezpośredniego pomiaru konwergencji wynika też sposób pomiaru różnic przemieszczeń. Istotą tego sposobu jest założenie sztywnej bazy między jednym punktem a ruchomym przyziarem połączonym z drugim punktem. Odczyt na przyziarze jest wtedy odpowiednią do odstępu czasu konwergencją liniową. Tak obserwowano konwergencję w latach 40. XX w. w kopalni Solno i nadal mierzy się konwergencję w kopalni Kłodawa. Metodę różnic przemieszczeń wykorzystuje się też do pomiaru odspojeń stropu np. w Wieliczce.

Pomiar fotogrametryczny konturu wyrobiska jest metodą pomiaru konwergencji powierzchniowej. Szerzej metoda została opisana w publikacji [Szpetkowski 1978]. Coraz bardziej zautomatyzowane techniki obróbki obrazu pozwalają na identyfikację dowolnej liczby punktów konturu wyrobiska, a dzięki temu określać można konwergencje liniowe w wielu przekrojach konturu wyrobiska, a także analizować deformacje wzdłuż każdego odcinka konturu. Pomimo wielu zalet metoda fotogrametryczna ma niską dokładność i nie jest obecnie wykorzystywana w praktyce górniczej.

Metoda pomiaru skanerem laserowym [Maciaszek 2008] jest najbardziej wszechstronna – pozwala na określanie konwergencji liniowych, powierzchniowych i objętościowej wyrobiska, również na analizę rozkładu deformacji na ociosach, w stropie i spągu wyrobiska,

nie jest jednak w kopalniach stosowana, ze względu na duże ciągle jeszcze koszty wykonania samego pomiaru.

Niegeodezyjne sposoby pomiaru konwergencji wykorzystywane są w górnictwie otworowym dla określenia objętościowej konwergencji kawern. Polegają one także na bezpośrednim i pośrednim pomiarze konwergencji poprzez:

- pomiar objętości samowypływu solanki;
- pomiar zmian ciśnienia w kawernie;
- pomiar kształtu kawerny echosondą.

Objętość solanki, która wypływa z rur wiertniczych odpowiada konwergencji objętościowej kawerny. Obserwacje samowypływu solanki przeprowadza się ze stałą częstotliwością, np. raz na dobę przez okres kilku miesięcy. Sposób ten jest metodą bezpośredniego pomiaru konwergencji objętościowej. Zamknięcie otworu zwiększa ciśnienie w kawernie solankowej. Zwiększanie się ciśnienia w kawernie jest skutkiem jej zaciskania. Znając ściśliwość solanki z przyrostu ciśnienia na głowicy otworu wyliczyć można konwergencję objętościową. Inny pomiar konwergencji polega na obserwacji przyrostu ciśnienia i pomiarze objętości samowypływu po otwarciu głowicy otworu. Wykonuje się je w jednym lub kilku cyklach pomiarowych, przy założonym maksymalnym ciśnieniu lub zmieniając jego poziom [Określenie *in-situ*... 1980]. Sposoby te stosowane są w polskich otworowych kopalniach soli. Metoda pomiaru konwergencji objętościowej przy użyciu echosondy polega na określaniu różnicy objętości z dwóch pomiarów geofizycznych kawerny.

Dokładność wyżej wymienionych metod pomiaru konwergencji jest różna. Najdokładniejsze są metody oparte na pomiarach konwergencji liniowej oraz pomiar konwergencji objętościowej na podstawie samowypływu solanki i dlatego powszechnie się je stosuje. Pomiar konwergencji liniowej nie obejmuje jednak ruchu wszystkich punktów konturu wyrobiska. Ze względów poznawczych, pomimo znacząco mniejszych dokładności, na uwagę zasługuje metoda pomiaru echosondą, ze względu na możliwość poznania rozkładu konwergencji w dużym przedziale głębokości. Wartościowe byłyby też pomiary konwergencji objętościowej skanerem laserowym. Przydatność tych pomiarów powinna być uzależniona od określenia dokładności pomiaru objętości w odniesieniu do prędkości konwergencji objętościowej.

W zależności od skali obserwowanego obiektu pomiary konwergencji można podzielić na pomiary:

- mikroskalowe – zaciskanie otworu wiertniczego,
- średnioskalowe – konwergencja chodnika, komory,
- wielkoskalowe – zaciskanie pola górniczego, kopalni.

Pomiary mikroskalowe przeprowadza się w otworach wiertniczych. Ich celem jest rozpoznanie właściwości skał w warunkach *in-situ* [Dreyer 1972, Baar 1977, Potts i in. 1980, Amadei, Stephanson 1997, Muson 1997]. Pomiary średnioskalowe wykonuje się w celu określenia konwergencji poszczególnych wyrobisk, a właściwie określenia lokalnego ruchu górotworu. Pomiary konwergencji liniowej w chodnikach należą do tej grupy pomiarów. Wielkoskalowe zaciskanie dotyczy znacznych przestrzeni kopalni. Określa globalny ruch górotworu w otoczeniu pola górniczego lub całej kopalni. Szacowaniu tego ruchu służą pomiary przemieszczeń pionowych i poziomych we wnętrzu kopalni, np. na górnych i dolnych poziomach, jak w kopalni Solno czy Wapno.

### 3.2. Stacje pomiarowe

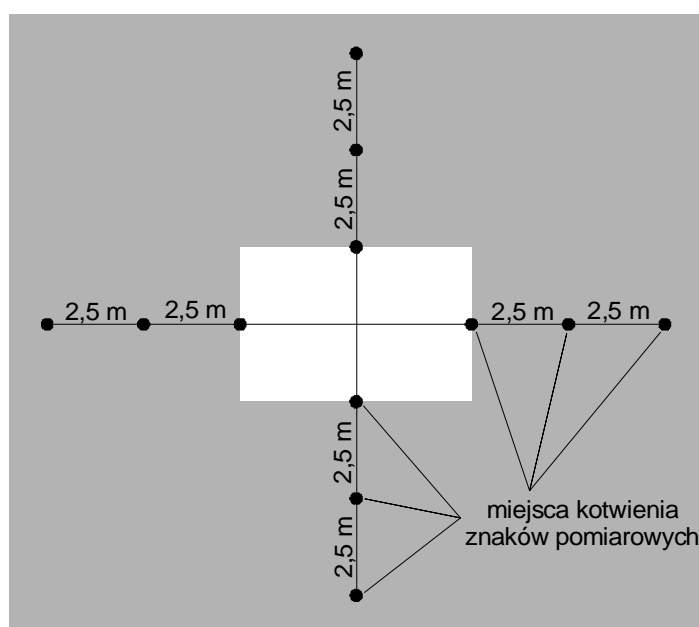
Stacje pomiarowe zakłada się zgodnie z projektem sieci dla obserwacji konwergencji. Z upływem czasu uzupełnia się tę sieć w zależności od potrzeb. Stację pomiarową tworzą bazy pomiarowe. Jednostkową bazę pomiarową stanowią dwa znaki pomiarowe zastabilizowane po przeciwnych stronach konturu wyrobiska. Znaki pomiarowe wystają poza kontur wyrobiska i mają główkę przystosowaną do założenia odpowiedniego urządzenia pomiarowego. Bazy do pomiaru konwergencji zakłada się w osiach wyrobiska lub w innym miejscu, jeżeli występują przeszkody w postaci ciągów wentylacyjnych, rurociągów, taśmociągów, kabli, torów kolejowych, trakcji i in.

Stacje pomiarowe zakłada się w różnych celach i od tego celu zależy jej konstrukcja. Najczęściej spotykane stacje pomiarowe to:

- stacja prosta,
- stacja poszerzona,
- stacja wielobazowa,
- stacja profilowa,
- stacja krzyżowa,
- stacja wielopoziomowa,
- stacja ekwiwalentna.

Prosta stacja pomiarowa składa się z jednej bazy pionowej i jednej bazy poziomej założonych w osiach wyrobiska. Taki układ stacji pomiarowej charakterystyczny jest dla wyrobisk chodnikowych. Zdarza się, że z powodu braku dostępu baza nie znajduje się dokładnie w osi wyrobiska – dotyczy to części bazy poziomych.

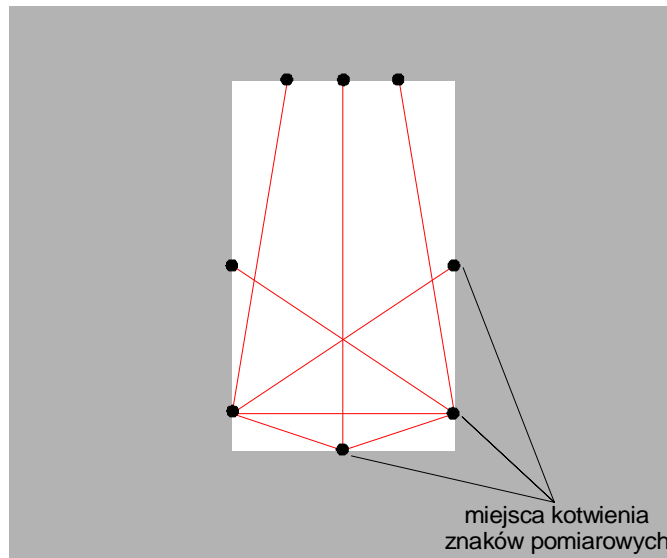
Stacje poszerzone służą pomiarowi konwergencji konturu wyrobiska i przemieszczeń w głębszych partiach górotworu. Na takich stacjach znaki pomiarowe stabilizuje się na konturze wyrobiska oraz w kilku określonych odległościach od niego w głębi górotworu (rys. 3.2). Stalowy pręt kotwiony jest w specjalnie odwierconych otworach i wystaje poza kontur wyrobiska, podobnie, jak zwykły znak pomiarowy. W polskich kopalniach soli spotykany jest układ głębokości stabilizacji znaków: 0 (kontur wyrobiska) – 2,5 m (w głąb od konturu) – 5,0 m (Siedlec, Sieroszowice) oraz 0 m – 1 m – 2 m – 3 m – 4 m – 8 m (Kłodawa).



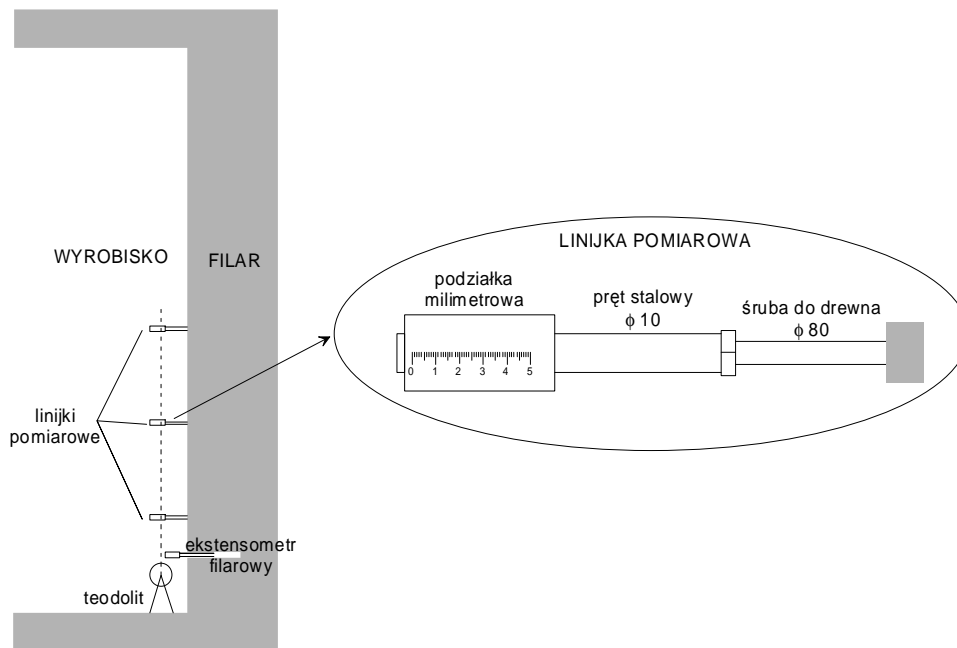
Rys. 3.2. Przykład poszerzonej stacji konwergencyjnej

Stacje wielobazowe (rys. 3.3) składają się z wielu baz poziomych, pionowych i skośnych założonych zwykle w jednej płaszczyźnie pionowej wyrobiska komorowego, w którym pomiar konwergencji głównej poziomej jest niemożliwy ze względu na wysokość komory.

Stacja profilowa (rys. 3.4) służy do obserwacji profilu konturu wyrobiska. Składa się z kilku baz poziomych i pionowych, założonych w różnych odległościach na konturze wyrobiska. Pozwala to na pomiar przemieszczeń w przekroju wyrobiska.



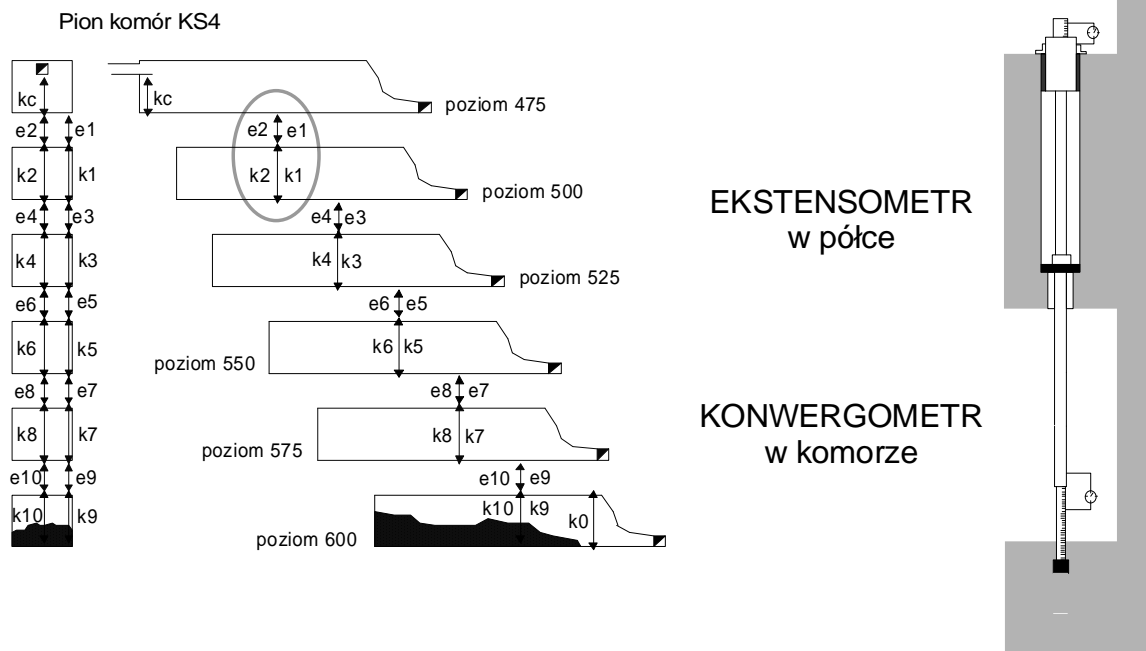
Rys. 3.3. Stacja wielobazowa



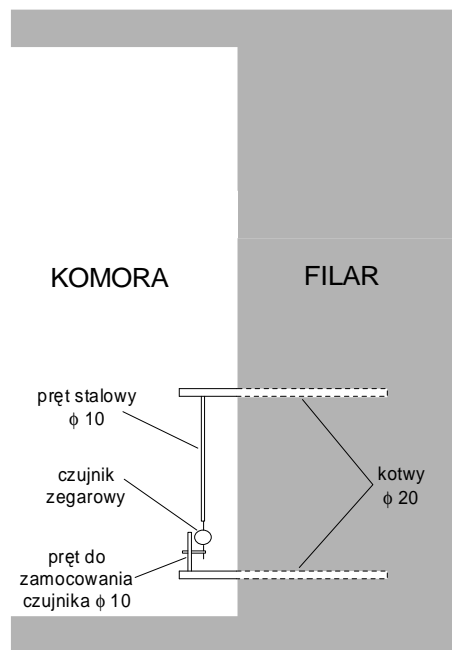
Rys. 3.4. Stacja profilowa (na podst. [Projekt prac... 1978])

Szczególnym miejscem podlegającym zaciskaniu są skrzyżowania chodników. Stacje krzyżowe w kopalni Kłodawa składają się z trzech prostych stacji konwergencyjnych założonych w chodnikach w odległości ok. 1 m od skrzyżowania.

Przykładem stacji wielopoziomowych są założone w kopalni kłodawskiej bazy do pomiaru zaciskania komór i poszerzania półek międzypoziomowych w wybranym pionowym ciągu komór (rys. 3.5). Takie stacje wyposażone są w specjalnie do tego zaprojektowane zestawy konwergometrów i ekstensometrów.



Rys. 3.5. Wycinek stacji wielopoziomowej w kopalni Kłodawa (na podst. [Kortas 1984])



Rys. 3.6. Stacja ekwiwalentna (na podst. [Projekt prac... 1978])

Stację ekwiwalentną (rys. 3.6) zakłada się, gdy nie jest możliwe zmierzenie całego odcinka bazy, a przyjmuje się, że odcinek skraca się równomiernie na całej swojej długości. Taka sytuacja ma miejsce, gdy mierzy się np. konwergencję pionową wyrobiska przy ociosie. Zamiast mierzyć zaciskanie 15 m komory mierzony jest tylko jej 2,5 metrowy wycinek.

### 3.3. Przyrządy pomiarowe

W pomiarach konwergencji liniowych wykorzystuje się typowy sprzęt geodezyjny oraz szereg przyrządów specjalnie zaprojektowanych do pomiarów w wyrobiskach kopalnianych i tunelach. Przyrządy do pomiaru konwergencji można sklasyfikować według kilku kryteriów. Jednym z kryteriów jest obiekt obserwacji.

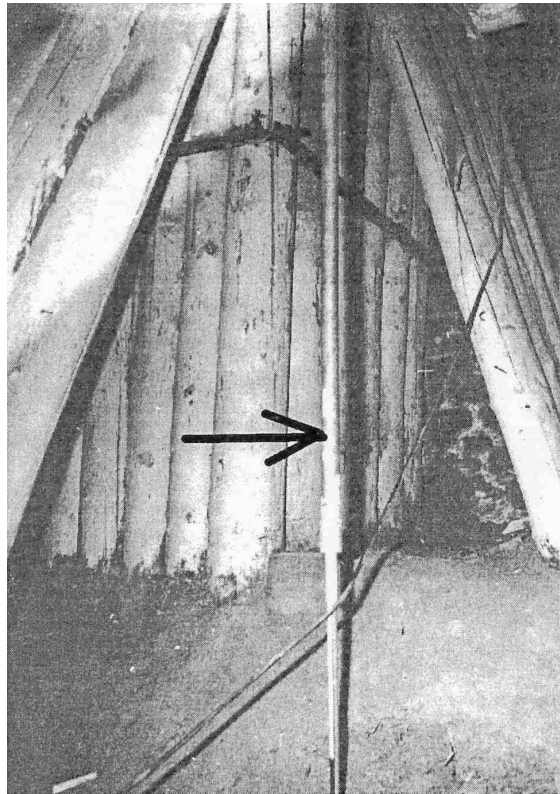
Stosowany jest podział na konwergometry, służące do pomiarów pustki w górotworze i ekstensometry, do pomiarów calizny. W publikacjach i dokumentacjach pomiarowych obie te nazwy niekiedy używane są wymiennie. W publikacjach anglojęzycznych występuje jedna nazwa dla wszystkich tego typu przyrządów – „*extensometer*”; wyjątkowo spotykana jest nazwa „*convergence meter*” [De Souza i in. 1997].

<b>pomiar pustek</b> <i>konwergometry</i> convergere = zbiegać się	<b>pomiar calizn</b> <i>ekstensometry</i> extension = rozszerzenie, wydłużenie
--------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------

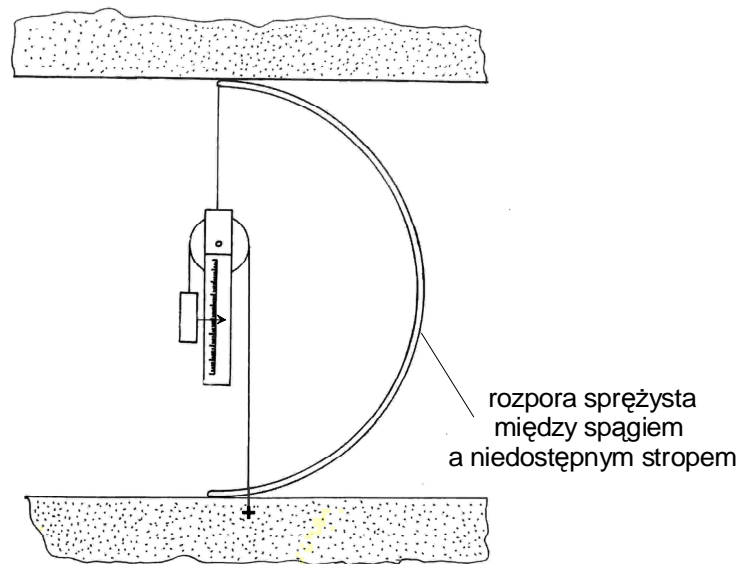
Innym kryterium klasyfikacji przyrządów pomiarowych jest ich mobilność. Wyróżnia się przyrządy stacjonarne i przenośne. Przyrządy stacjonarne służą do bezpośredniego pomiaru konwergencji, a przenośne do pomiarów pośrednich.

Przykładem najprostszych przyrządów stacjonarnych są znalezione w kopalni w Inowrocławiu dwie pionowe deski, stykające się ze sobą deski, osadzone w stropie i spągu wyrobiska. Na jednej z nich zaznaczano położenie końca drugiej i daty odczytu [informacja ustna]. Podobnie działają bazy rurowe (rys. 3.7). Dwie rury stalowe zakotwione są w spągu i stropie w ten sposób, że jedna wchodzi w drugą. Długość odczytuje się z milimetrowej linijki i czujnika mikrometrycznego o rozdzielczości 0,01 mm. Stacja pomiarowa z takim przyrządem nadal włączona jest do sieci do obserwacji konwergencji w Wieliczce (komora Michałowice). Ta zasada pomiaru jest nadal szeroko stosowana, a współczesnym udogodnieniem rejestracji wyników pomiarów są systemy zdalnego odczytu z zapisem danych w pamięci urządzenia mierniczego lub w komputerze odbiornika.

Zamiast rur zastosować można rozciągnięte pomiędzy znakami pomiarowymi druty stalowe lub inwarowe. Drut jest wtedy obciążony stale lub tylko w trakcie pomiaru ciężarkiem o masie np. 15 kg. Z jednej strony znajduje się urządzenie odczytowe składające się z czujnika mikrometrycznego o rozdzielczości 0,01 mm i linijki ze skalą z podziałem 1 mm. W przyrządach stacjonarnych stosuje się również pręty pomiarowe [Sellers 1970]. Przykład konwergometru stacjonarnego pokazano na rys. 3.8.



Rys. 3.7. Baza rurowa w komorze Michałowie [Bieniasz, Wojnar 2007]

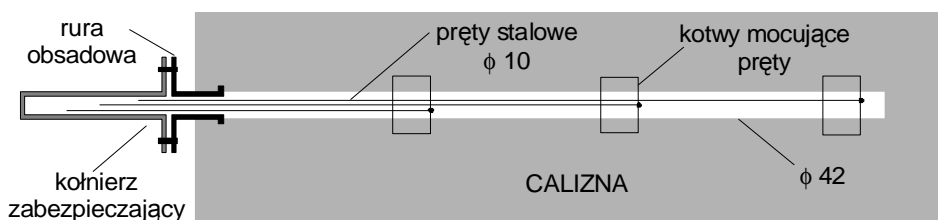


Rys. 3.8. Przykład przyrządu stacjonarnego [Świadectwo... 1986]

W wyrobiskach o dużej wysokości stosuje się pomiar baz ekwiwalentnych (rys. 3.6). Konergometr ekwiwalentny składa się z dwóch półtorametrowych prętów zakotwionych na różnych wysokościach przy ścianie komory, np. na wysokości 0,5 m i 3 m nad spągkiem

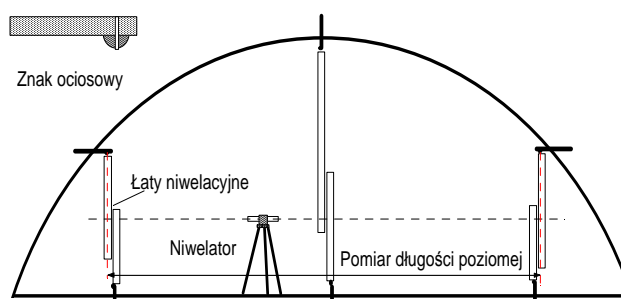
wyrobiska. Prostopadle do wyższej kotwi przymocowany jest sztywny pręt stalowy, który zachodzi na urządzenie odczytowe przymocowane do kotwi dolnej.

Ekstensometr do pomiaru poszerzania się filarów i półek (rys. 3.9) składa się z kilku prętów o różnych długościach, których końce stabilizuje się w różnych odległościach od konturu wyrobiska klinami z przelotkami tak, aby nie hamowały ruchu prętom dłuższym. Przy konturze wyrobiska mocowane jest urządzenie odczytowe. Zamiast prętów mogą być stosowane druty ze stałym napięciem. Ekstensometr do pomiarów poszerzania się filarów i półek to drut w rurze klinowany po przeciwnej stronie filara. Poszerzanie filara lub półki identyfikuje się przez obserwację chowania się drutu w otworze i rejestrację urządzeniem odczytowym o rozdzielczości 1 mm.



Rys. 3.9. Schemat ekstensometru filarowego (na podst. [Projekt prac... 1978])

Omówione przykłady prowadzą do bezpośredniego pomiaru konwergencji liniowej. Wartości konwergencji mogą być określone pośrednio poprzez wielokrotny pomiar odległości między znakami pomiarowymi. Uzyskać to można stosując typowe instrumenty geodezyjne lub specjalistyczne przyrządy. Przykładem wykorzystania niwelatora i łat niwelacyjnych do pomiaru odległości jest sposób stosowany w kopalni Bochnia przez L. Józefkę [Kortas, Józefko 2001]. Krótkie bazy pionowe mierzone są łatami do niwelacji precyzyjnej przykładanymi do znaków pomiarowych (rys. 3.10).



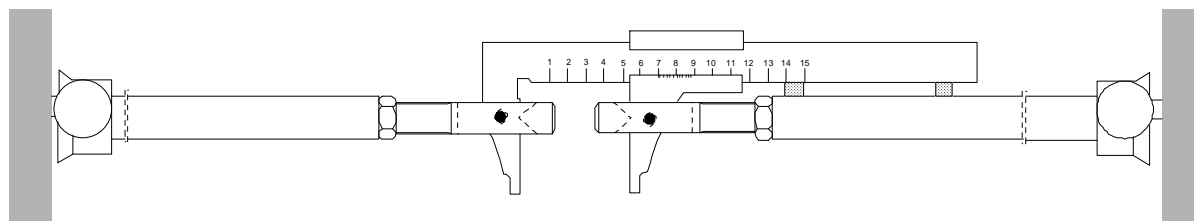
Rys. 3.10. Schemat pomiaru konwergencji przy pomocy łat i niwelatora [Kortas, Józefko 2001]

Konwergometry przenośne mierzą odległość między znakami pomiarowymi.

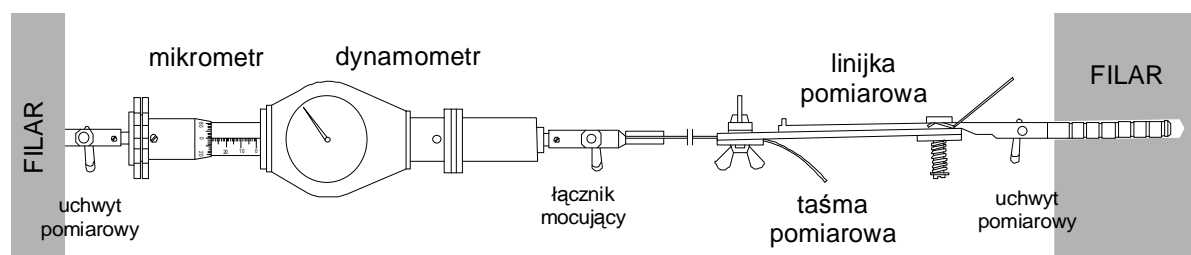
Konwergometry stosowane w kopalniach soli (rys. 3.11-3.13) składają się z:

- uchwytów, zaczepów lub zacisków służących do zamocowania przyrządu na znakach pomiarowych w sposób umożliwiający powtarzalność czynności;
- urządzenia zapewniającego naciąg przyrządu;
- właściwego urządzenia pomiarowego - nastawnego;
- urządzenia odczytowego.

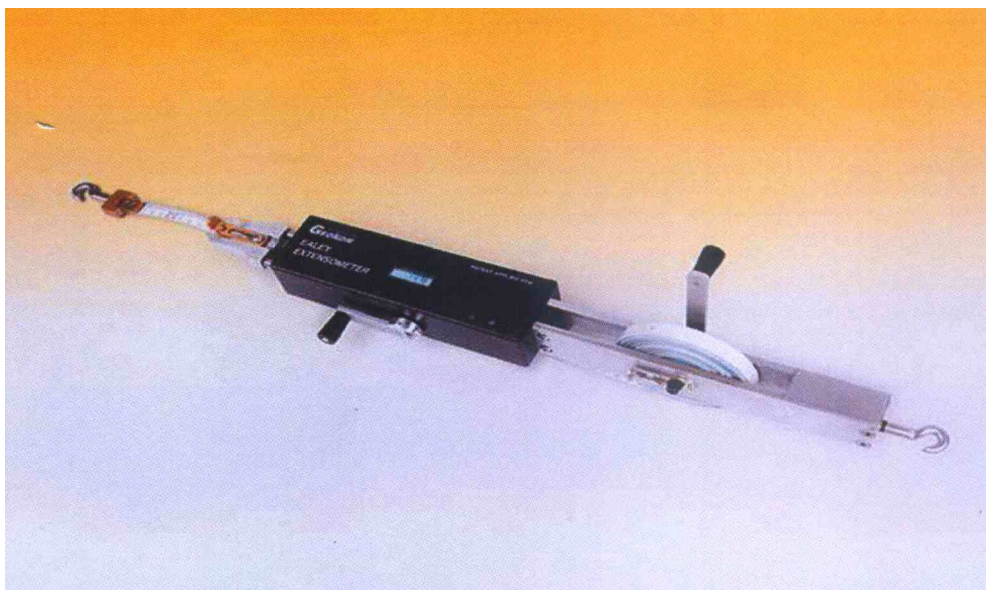
Urządzeniem pomiarowym może być taśma miernicza lub drut, zestaw prętów o różnych długościach lub rurek wysuwających się teleskopowo. W trakcie pomiaru nastawia się na nim odpowiednią długość (odczyt gruby). Konwergometr z urządzeniem pomiarowym w postaci prętów lub rurek jest tak skonstruowany, aby zapewnić sztywność całego przyrządu. W przypadku stosowania taśmy lub drutu mierniczego konieczny jest odpowiedni naciąg, zwykle z siłą 100 lub 50 N. Zapewniany jest on dzięki zastosowaniu odpowiednich zaczepów, przegubów oraz dynamometru. Urządzeniem odczytowym może być suwmiarka (w przyrządach sztywnych) lub śruba mikrometryczna. Śrubę dokręca się tak, aby na dynamometrze ustawić żadaną siłę naciągu. Urządzenia posiadają odpowiednie końcówki mocowane na znakach pomiarowych. Znakami są zastabilizowane w caliznie trzpienie, śruby, kotwy z odpowiednio uformowaną główką.



Rys. 3.11. Konwergometr prętowy z suwmiarką (na podst. [Opomiarowanie... 1987])



Rys. 3.12. Konwergometr taśmowy ze śrubą mikrometryczną GK-1 (na podst. [Opomiarowanie... 1987])



Rys. 3.13. Konwergometr taśmowy model 1610 firmy Geokon [www.geokon.com]

Obecnie coraz częściej stosuje się dalmierz laserowy (rys. 3.14) z przymocowanym zaciskiem do mocowania na znaku pomiarowym [Bieniasz i in. 2003a]. Drugi znak stanowi tarcza celownicza. Niższa niż w przypadku konwergometrów i niwelatora dokładność jest wystarczająca do pomiaru konwergencji na większych głębokościach lub przy wieloletnim odstępie czasu między obserwacjami.



Rys. 3.14. Dalmierz laserowy i tarcza celownicza przymocowane do specjalnie zastabilizowanych znaków pomiarowych [www.chemkop.pl]

Przedstawiony opis sposobów i przyrządów pomiarowych nie obejmuje ich pełnej różnorodności. Jest tylko ilustracją metod dostosowanych do specyficznych warunków i potrzeb obserwacji i badań zaciskania wyrobisk solnych. Skuteczność tych metod zależy od ich dokładności i koniecznych nakładów pracy.

### 3.4. Dokładność pomiaru konwergencji

Dokładność pomiarów zależy od warunków w jakich prowadzone są pomiary, czynności pomiarowych i stosowanych urządzeń. W publikacjach i dokumentacjach pomiarowych na ogół brak takich danych. Dokładność pomiaru odległości dalmierzem laserowym wynosi wg danych producenta i użytkowników ok. 2-3 mm w zakresie pomiaru do kilkudziesięciu metrów [Bieniasz i in. 2003a]. Dokładność konwergometru suwmiarkowego wynosi ok.  $\pm 0,5$  mm, a średni błąd określenia konwergencji ok.  $\pm 0,7$  mm przy pomiarze do 6 m. Konwergometry i ekstensometry taśmowe i drutowe ze stałym naciąganiem i z wbudowanymi śrubami mikrometrycznymi wg producenta osiągają dokładność  $\pm 0,3$  mm, a średni błąd określenia konwergencji to ok.  $\pm 0,5$  mm/25 m.

W kopalni soli Kłodawa zostały przeprowadzone pomiary długości baz konwergencyjnych. Proste stacje pomiarowe założone zostały na różnych głębokościach kopalni w oddaleniu od pól górniczych.. W sumie obserwacjami objęto 16 baz pomiarowych. Do pomiarów używano konwergometru taśmowego GK-1 skonstruowanego w instrumentarium Wydziału Geodezji Górniczej AGH w Krakowie. Każdą bazę zmierzono 3 razy w około rocznym i potem około dwuletnim odstępie czasu. Jest to jednak jeszcze zbyt krótki odstęp czasu, by otrzymać wiarygodne wyniki pomiarów konwergencji, zwłaszcza na początku prowadzenia obserwacji. W tej pracy podjęto natomiast próbę oszacowania dokładności tego pomiaru konwergencji, obserwowanej konwergometrem taśmowym, i określenia częstotliwości przeprowadzania pomiarów konwergencyjnych.

Na każdorazowy pomiar długości bazy składały się 3 odczyty długości taśmy (metry i decymetry), linijki (centymetry) i śruby mikrometrycznej (centymetry i milimetry oraz dziesiąte i setne części milimetra) przy różnych ustawieniach linijki. Taśma napinana była ze stałą siłą 100 N mierzoną dynamometrem. Rozdzielczość odczytu to 0,02 mm. Przy wyznaczaniu konwergencji na podstawie dwóch pomiarów długości uwzględniana była poprawka na temperaturę. Przy ustalonym systemie wentylacyjnym kopalni różnice w temperaturze na każdej ze stacji pomiarowych wynosiły ok. 1°C.

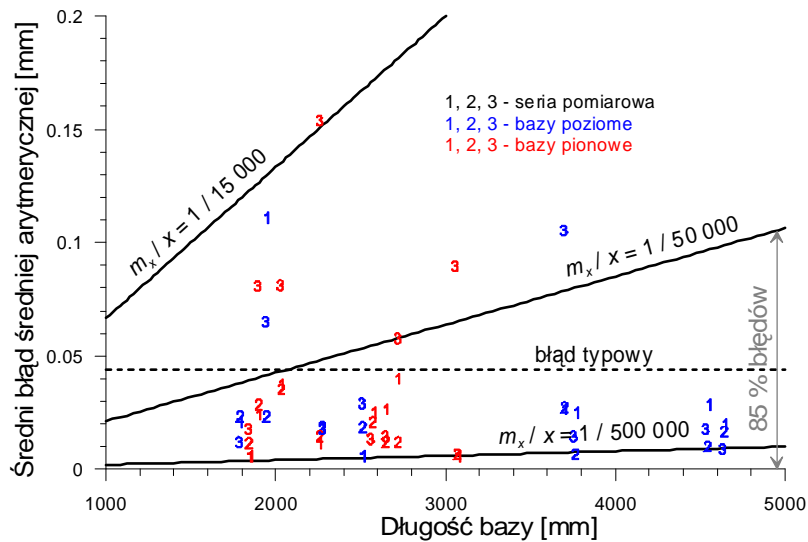
Niech  $i$  jest numerem bazy ( $i \in [1, 16]$ ),  $j$  – numerem serii pomiarowej ( $j \in [1, 3]$ ),  $n$  – ilością odczytów ( $n = 3$ ),  $l = j - 1$  jest numerem konwergencji liniowej baz ( $l \in [1, 2]$ ). Dla każdej bazy i każdej serii pomiarowej wyznaczono błąd średni pojedynczego spostrzeżenia według wzoru:

$$m_{ij} = \pm \sqrt{\frac{[vv]}{n-1}}, \text{ gdzie } [vv] \text{ to suma kwadratów odchylek} \quad (3.1)$$

oraz średni błąd średniej arytmetycznej:

$$m_{\bar{x}_{ij}} = \pm \frac{m_{ij}}{\sqrt{n}}. \quad (3.2)$$

Dla poszczególnych baz i serii pomiarowych błąd pojedynczego spostrzeżenia wynosił od 0,01 mm do 0,19 mm. W jednym przypadku wyniósł on 0,27 mm. Błąd średniej arytmetycznej mieścił się w granicach od 0,006 mm do 0,111 mm, w jednym przypadku 0,154 mm. Wartości błędów w zależności od długości bazy, z podziałem na bazy pionowe i poziome oraz serie pomiarowe pokazano na rys. 3.15.



Rys. 3.15. Średnie błędy średniej arytmetycznej wyliczone dla poszczególnych baz i serii pomiarowych

Większość błędów względnych (85%), obliczonych jako stosunek błędu średniego pomiaru długości do długości, mieściła się w granicach od 1:500000 do 1:50000, co również zilustrowano na rys. 3.15. Tylko 15% błędów względnych wynosiło od 1:50000 do 1:15000. Analiza dokładności przeprowadzona inną metodą dla pomiaru przemieszczeń tym samym urządzeniem w kopalni Bochnia między punktami odległymi średnio o 24,7 m wykazała podobną wartość błędów względnych 1:50000 [Kortas 2004].

Średnie błędy średnich arytmetycznych są podstawą do wyznaczenia błędów pomiaru konwergencji, konwergencji względnej i prędkości konwergencji względnej dla każdej bazy i dwóch odstępów czasu pomiędzy pomiarami ( $l = 2$ ). Jeżeli:

$$k_{ik} = L_{ij+1} - L_{ij} = \Delta L_{ik}, \quad (3.3)$$

$$\xi_{ik} = \frac{L_{ij+1} - L_{ij}}{L_i} = \frac{\Delta L_{ik}}{L_i} \quad (3.4)$$

$$\text{i } \dot{\xi}_{ik} = \frac{L_{ij+1} - L_{ij}}{L_i(t_{ij+1} - t_{ij})} = \frac{\Delta L_{ik}}{L_i \Delta t_{ik}}, \quad (3.5)$$

to z prawa przenoszenia błędów średnich Gaussa można wyprowadzić wzory:

$$m_{k_{ik}} = \pm \sqrt{m_{x_{ij+1}}^2 + m_{x_{ij}}^2}, \quad (3.6)$$

$$m_{\xi_{ik}} = \pm \frac{1}{L_i} \sqrt{m_{x_{ij+1}}^2 + \frac{L_{ij+1}^2}{L_i^2} m_{x_{ij}}^2} \quad (3.7)$$

$$\text{i } m_{\dot{\xi}_{ik}} = \pm \frac{1}{L_i \Delta t_{ik}} \sqrt{m_{x_{ij+1}}^2 + \frac{L_{ij+1}^2}{L_i^2} m_{x_{ij}}^2} \quad (3.8)$$

a ponieważ  $L_{ij+1} \approx L_i$ , to:

$$m_{\xi_{ik}} = \pm \frac{1}{L_i} \sqrt{m_{x_{ij+1}}^2 + m_{x_{ij}}^2} \quad (3.9)$$

$$\text{i } m_{\dot{\xi}_{ik}} = \pm \frac{1}{L_i \Delta t_{ik}} \sqrt{m_{x_{ij+1}}^2 + m_{x_{ij}}^2}. \quad (3.10)$$

Podstawiając do wzorów przykładowe wartości błędów pomiaru bazy  $i$  o długości  $L_{i0} = 1,95$  m, które wynoszą: dla pomiaru  $j = 0$   $m_{x_{i0}} = \pm 0,111$  mm i dla pomiaru  $j = 1$   $m_{x_{i1}} = \pm 0,065$  mm, średni błąd pomiaru konwergencji (różnicy pomiarów  $k = 1$ ) wynosi  $m_{k_{i1}} = \pm 0,129$  mm, średni błąd wyznaczenia konwergencji względnej  $m_{\xi_{i1}} = \pm 0,066\%$  a prędkości konwergencji względnej  $m_{\dot{\xi}_{i1}} = \pm 0,020\%/rok$ .

Powyższe wzory będą przydatne do wyznaczania błędów pomiarów konwergencji mierzonej na poszczególnych bazach, ponieważ różne są błędy wyznaczenia poszczególnych długości. Jednak wyznaczanie błędów pomiaru konwergencji w oparciu o średnie błędy każdorazowego pomiaru długości wymaga szczegółowej analizy dokładności przeprowadzanej dla każdej bazy oddzielnie. Dlatego, na podstawie dotychczas wykonanych pomiarów w kopalni Kłodawa, podjęto próbę oszacowania typowego błędu pomiaru konwergencji konwergometrem taśmowym GK-1. W tym celu zbiór średnich błędów średnich arytmetycznych potraktowano jak odchyłki i obliczono na ich podstawie typowy średni błąd pojedynczego spostrzeżenia według wzoru:

$$m_{L_{typ}} = \pm \sqrt{\frac{[m_{x_{ij}}^- m_{x_{ij}}^-]}{n-1}}, \quad (3.11)$$

gdzie  $n = 48$  (16 baz x 3 serie pomiarowe). Typowy błąd pomiaru długości wyniósł  $m_{L_{typ}} = \pm 0,044$  mm. Stąd typowy błąd wyznaczenia konwergencji wynosi  $m_{k_{typ}} = \pm m_{L_{typ}} \sqrt{2} = \pm 0,062$  mm. Wyznaczona tu dokładność pomiaru zależy od staranności jego wykonania. Trzecia seria pomiarowa, ze względu na brak fachowej pomocy ze strony Kopalni, przeprowadzona została z mniejszą starannością, co zaważyło na dokładności. Druga seria natomiast była wykonywana z nadmierną w stosunku do otrzymanych wyników, a więc mało ekonomiczną starannością. Widoczne jest to już na rys. 3.15. Typowy błąd pomiaru w pierwszej serii wyniósł  $m_{L_{typ}} = \pm 0,037$  mm, w drugiej  $m_{L_{typ}} = \pm 0,020$  a w trzeciej  $m_{L_{typ}} = \pm 0,066$  mm.

**Częstotliwość pomiarów**, czyli odstęp pomiędzy dwiema seriami pomiarów długości baz konwergometrem taśmowym zależeć powinien od szybkości procesu zaciskania wyrobiska. Aby zauważyć proces w wynikach pomiarów, prędkość konwergencji powinna być większa niż błąd graniczny jej wyznaczenia, czyli:

$$|\dot{k}| > 3m_k. \quad (3.12)$$

Błąd wyznaczenia prędkości konwergencji jest równy błędowi pomiaru konwergencji podzielonemu przez odstęp czasu między pomiarami:

$$m_k = \frac{m_k}{\Delta t}. \quad (3.13)$$

Można więc napisać:

$$|\dot{k}| > 3 \frac{m_k}{\Delta t}, \quad (3.14)$$

stąd minimalny odstęp między pomiarami wynosi:

$$\Delta t_{\min} = 3 \frac{m_k}{|\dot{k}|}. \quad (3.15)$$

Jeśli konwergencja jest różnicą długości baz  $L_j$  i  $L_{j+1}$  pomierzonych w  $j$ -tej i  $j+1$  serii pomiarowej:  $k = L_{j+1} - L_j$ , to błąd konwergencji według prawa przenoszenia się błędów Gaussa jest równy  $m_k = \sqrt{m_{L_{j+1}}^2 + m_{L_j}^2}$ . Na podstawie powyższego wzoru można obliczyć błąd pomiaru konwergencji dla każdej bazy osobno podstawiając pod  $m_{L_{j+1}}$  i  $m_{L_j}$  odpowiednie wartości średniego błędu średniej arytmetycznej. Można też wykorzystać wartość błędu typowego:

$$m_k = m_{Ltyp} \sqrt{2}. \quad (3.16)$$

Wtedy minimalny czas między pomiarami opisać można wzorem:

$$\Delta t_{min} = 3\sqrt{2} \frac{m_{Ltyp}}{|k|}. \quad (3.17)$$

Wzór (3.17) można wykorzystać do określenia minimalnego odstępu czasu między pomiarami w innych warunkach, o ile znana jest wartość błędu  $m_{Ltyp}$ . I tak dla  $m_{Ltyp} = \pm 0,044$  mm i prędkości konwergencji  $k' = -1$  mm/rok otrzymuje się  $\Delta t_{min} = 0,18$  roku, czyli 2 miesiące. Zakładając, że pomiary tym samym urządzeniem prowadzone będą na bazach 5 krotnie dłuższych oraz że  $m_{Ltyp}$  jest wprost proporcjonalny do długości baz, to  $\Delta t_{min} = 11$  miesięcy, czyli około 1 roku.

Nominalna dokładność pomiaru długości dalmierzem to  $\pm 3$  mm [Wykonanie pomiarów... 2005]. Taka dokładność, według wzoru 3.17, wymaga dłuższych odstępów między pomiarami:  $\Delta t_{min} = 12,7$  roku dla prędkości konwergencji równej  $-1$  mm/rok. Założona przyjęta 5-letnia częstotliwość pomiarów daje gwarancję zaobserwowania zjawisk zachodzących z większą niż  $-2,5$  mm/rok prędkością.

### 3.5. Podsumowanie i wnioski

W rozdziale 3 przedstawiono techniki pomiaru konwergencji: metody pomiaru, rodzaje zakładanych stacji pomiarowych oraz przyrządy pomiarowe. Metody pomiaru konwergencji podzielono na geodezyjne i niegeodezyjne. Spośród wielu metod geodezyjnych najbardziej rozpowszechnioną metodą pomiaru jest pomiar długości odcinka. Opis przyrządów mierzących odległość. Stacje pomiarowe sklasyfikowano według celu, jakiemu miały służyć wyniki pomiarów.

Przeprowadzono analizę dokładności pomiaru konwergencji konwergometrem GK-1 i określono typowy błąd wyznaczenia konwergencji, który wyniósł  $\pm 0,062$  mm. Obliczono też częstotliwość, z jaką można wykonywać pomiary konwergencji, w zależności od przewidywanej szybkości zaciskania wyrobiska.

Z przeprowadzonych analiz wynika, że pomiar konwergencji, oparty na geodezyjnym pomiarze długości odcinka, jest pomiarem łatwym do przeprowadzenia, mało kosztownym i wystarczająco dokładnym o ile częstotliwość pomiarów dobrana będzie do tempa zaciskania i użytego przyrządu.

## **4. Wyniki pomiarów konwergencji i ich interpretacja opisowa**

Kilkadziesiąt lat obserwacji geodezyjnych w polskich kopalniach soli zaowocowało obszernym, ale niejednorodnym zestawem danych o konwergencji. W tym rozdziale przedstawiono charakterystyczne wyniki pomiarów konwergencji w podziemnych kopalniach soli. Na wykresach pokazano związki konwergencji liniowej z czasem dla wybranych wyrobisk. Opisano także przykłady interpretacji tych wyników przez różnych autorów.

### **4.1. Charakterystyka polskich kopalń soli**

Polskie złoża soli kamiennej występują w dwóch formacjach solonośnych: cechsztyńskiej (górnym perm) i mioceńskiej. Formacja cechsztyńska pokrywa około 2/3 powierzchni Polski. W części północnej-zachodniej i środkowej kraju miąższość formacji przekracza 1000 m i maleje stopniowo ku południowemu wschodowi. Seria solna na większości obszaru zalega na dużych głębokościach, na Kujawach zapada do głębokości 5-7 km. Górniczo wykorzystane są tylko struktury wysadowe, przebite przez nadkładowe formacje skalne. Spośród wielu wysadów solnych regionu środkowopolskiego eksploatacją objęte zostały dotychczas: Wapno, Inowrocław, Kłodawa, Góra i Mogilno.

Na obrzeżach formacja cechsztyńska zalega na głębokości 2000-500 m. Są to obszary monokliny przedsudeckiej, wyniesienia Łeby i północnych peryferii Gór Świętokrzyskich. W monoklinie przedsudeckiej sól wydobywa się jedynie ze złoża Kaźmierzów w Sieroszowicach<sup>1</sup>. Trwają prace nad zagospodarowaniem złoża Mechelinki na wyniesieniu Łeby (Kosakowo) na cele zbiornika gazu.

Mioceńska formacja solonośna występuje prawie na całym obszarze zapadliska przedkarpackiego, wąskim pasem od Górnego Śląska, przez Kraków, Tarnów do wschodniej granicy kraju. Miąższość mioceńskiej formacji solonośnej wynosi od 250-400 m w okolicach Wieliczki, przez około 600 w Bochni do 1000 m w Szczepanowie. Prace górnicze prowadzono w złożach: Wieliczka, Barycz, Bochnia, Łęzkowice i Siedlec-Moszczenica.

---

<sup>1</sup> Legnicko-Głogowski Okręg Miedziowy

Sól kamienna wydobywana jest lub była w kopalniach podziemnych: Wieliczka, Bochnia, Wapno, Solno, Kłodawa, Siedlec-Moszczenica i Sierszowice oraz w kopalniach otworowych: Barycz, Łęzkowice, Góra i Mogilno. Przegląd danych o złożach soli i kopalniach podano w tabeli 4.1.

## 4.2. Pomiary konwergencji w polskich kopalniach soli

Pomiary konwergencji prowadzone są obecnie we wszystkich podziemnych i otworowych kopalniach soli w Polsce. Są często fragmentem szerszego programu obserwacji ruchu górotworu i powierzchni terenu [np. Szewczyk 2008]. Poniżej omówiono pomiary konwergencji tylko w kopalniach podziemnych. Przedstawione tu dane zostały zaczerpnięte z publikacji i opracowań [Analiza... 2000, 2002, 2003, 2004, 2005, Bieniasz i in. 2003b, Bieniasz, Wojnar 2007, 2008, *Bieżąca...* 1995, *Komora...* 2002, Kortas 1979, 2001, 2004, Kortas, Józefko 2001, *Ocena...* 2000, 2001a, b, c, *Podłużnia...* 2001, *Pomiary...* 1996, *Sprawozdanie...* 2002, 1988, 1994-1998, 1994, *Wykonanie...* 2005].

Pierwsze bazy do pomiaru konwergencji w kopalni **Wieliczka** założono pod koniec lat 70. ubiegłego wieku w komorze Michałowice. W połowie lat 80-tych dodano kilkadziesiąt baz pomiarowych, głównie na górnych – zabytkowych poziomach kopalni. W latach 90-tych rozpoczęto obserwacje w wyrobiskach zagrażających potencjalnymi zapadliskami na powierzchni. Obecnie obserwowanych jest około 80 wyrobisk komorowych oraz chodnikowych na poziomach I, II wyższym, II niższym, III, IV i V. Konwergencja liniowa mierzona jest głównie konwergometrem suwmiarkowym i dalmierzem laserowym, a także z wykorzystaniem niwelatora precyzyjnego.

Spośród 530 baz w chodnikach obserwowanych jest 47 baz pionowych i poziomych. Wyrobiska kopalni znajdują się na małej głębokości i wartości konwergencji są tu niewielkie. W chodnikach największą konwergencję liniową o wartości -107,1 mm w okresie 15 lat zmierzono na dwumetrowej bazie horyzontalnej na poziomie III (-3,5 ‰/rok). Największe prędkości względnej konwergencji pionowej odnotowano na bazie o dł. 2 m mierzonej na V poziomie: -1,8 ‰/rok. Charakterystykę mierzonej konwergencji zamieszczono w rozdz. 3.3. W wyrobiskach komorowych największą prędkość konwergencji zaobserwowano w komorze Ferro na poziomie II<sub>n</sub>. Od 1985 roku średnia prędkość konwergencji wynosiła tam -4,2 ‰/rok. W ciągu ostatnich 5 lat prędkość wzrosła do -12,1 ‰/rok.

Tabela 4.1. Charakterystyka polskich kopalń soli (na podst. [Mokrzycki i in. 1996, *Centralna Baza Danych Geologicznych*])

Użytkownik	Złoże i rodzaj kopalni	Stan zagospodarowania	Charakterystyka wyrobisk
Kopalnia Soli Wieliczka S.A.	Wieliczka; pokładowe, mioceńskie; podziemna	eksploatacja złoża zaniechana, udostępniona dla turystów	Kopalnia historyczna, sieć chodników i komór o nieregularnym kształcie i zróżnicowanych wymiarach; głębokość eksploatacji od 50 do 300 m, średnia objętość komory ok. 2 tys. m <sup>3</sup>
	Barycz; pokładowe, mioceńskie; otworowa	złoże skreślone z bilansu zasobów, kopalnia zlikwidowana	Otwory eksploatacyjne w siatce trójkątów o boku od 30 do 60 m; głębokość eksploatacji do 400 m
Kopalnia Soli Bochnia P. P.	Bochnia; pokładowe, mioceńskie; podziemna	złoże skreślone z bilansu zasobów, udostępniona dla turystów	Kopalnia historyczna, sieć chodników i komór zgodna ze złożem, chodniki i komory o różnych wymiarach i kształtach; głębokość eksploatacji 100-420 m
	Łęzkowice; pokładowe, mioceńskie; otworowa	złoże skreślone z bilansu zasobów, kopalnia w likwidacji	Otwory eksploatacyjne w siatce trójkątów o boku 35 m; głębokość eksploatacji 60-430 m
	Siedlec-Moszczenica; pokładowe, mioceńskie; podziemna	eksploatacja złoża zaniechana, kopalnia zlikwidowana	Kopalnia w początkowej fazie eksploatacji; zlikwidowana; kilka chodników i komór; eksploatacja na głębokości 380 m
Kopalnia Soli Solno w Inowrocławiu*	Inowrocław; wysadowe, cechsztyńskie; podziemna	złoże skreślone z bilansu zasobów, kopalnia zlikwidowana	Eksploatacja 1934-1991 (kontrolowane zatopienie kopalni) ługownie na 10 poziomach, co 18 m od głębokości 470 m do 632 m; około 1400 komór; nad kopalnią zroby historycznych wyrobisk kopalni Kronprinz
Kopalnia Soli im. T. Kościuszki w Wapnie*	Wapno; wysadowe, cechsztyńskie; podziemna	eksploatacja złoża zaniechana, kopalnia zlikwidowana	Eksploatacja sucha w okresie 1923-1977 (katastrofalne zatopienie kopalni) na 6. poziomach od głębokości 384 m do 543 m; filar brzeżny 20-50 m
Kopalnia Soli Kłodawa S.A.	Kłodawa (cz. środkowa); wysadowe, cechsztyńskie; podziemna	złoże zagospodarowane, prowadzona eksploatacja udostępniona dla turystów	5 pól górniczych na głębokościach od 400 do 750 m; zakończona eksploatacja w polu 1 i 4, umiarowe komory 15 x 15 m z filarem 15 m i półką 10 m
Inowrocławskie Kopalnie Soli SOLINO S.A.	Góra; wysadowe, cechsztyńskie; otworowa	złoże zagospodarowane, prowadzona eksploatacja i zbiorniki paliw płynnych	Otwory eksploatacyjne w siatce trójkątów o boku 100 m, zakładana średnica kawern – 50 m; głębokość eksploatacji zróżnicowana, od 250 do 1700 m; w części otworów magazyn ropy i paliw płynnych
	Mogilno I; wysadowe, cechsztyńskie; otworowa	złoże zagospodarowane, prowadzona eksploatacja	Otwory eksploatacyjne w siatce trójkątów o boku 100 m, zakładana średnica kawern – 50 m; głębokość eksploatacji zróżnicowana, od 400 do 1400 m
INVESTGAS S.A.	Mogilno II; wysadowe, cechsztyńskie; otworowa	złoże zagospodarowane, magazyn gazu ziemnego	Otwory eksploatacyjne w siatce trójkątów o boku 270 m, zakładana średnica kawern – 50 m; głębokość eksploatacji zróżnicowana od 600 do 1200 m
	Mechelinki; pokładowe, cechsztyńskie; otworowa	budowa zbiorników gazu	Kopalnia otworowa, odwiercone 2 otwory (stan na 2009 r.)
KGHM Polska Miedź S.A.	Kaźmierzów; pokładowe, cechsztyńskie; podziemna	złoże zagospodarowane	Wydobycie systemem 3-5 równoległych chodników o wymiarach ok. 5,5x7 m z przecinkami łączącymi chodniki; chodniki na głębokości 900 m

\* - Podmiot zakończył działalność

Pomiary konwergencji w chodnikach kopalni w **Bochni** prowadzone były od 1980 roku na kilku poziomach eksploatacyjnych. Z kilkunastu założonych wtedy poziomych baz zachowała się tylko jedna. Bazy założone w latach 90-tych także uległy zniszczeniu. W latach 2004-2008 włączono do sieci pomiarowej chodników 6 baz poziomych i 1 pionową na poziomie August, 2 bazy poziome na poziomie Sienkiewicz oraz 2 poziome i 1 pionową na poziomie Wernier. Najdłużej zachowały się bazy w chodnikach dojściowych do Kaplicy Św. Kingi. Konwergencja jest tam mierzona od 1993 roku. Prędkość konwergencji względnej w tych chodnikach zawiera się w przedziale od -2 do -3 ‰/rok, co oznacza zmianę odległości między ociosami o 8,5-12,0 mm rocznie.

Poza chodnikami pomiary prowadzone są obecnie w komorach Kaplica Św. Kingi, Ważyn, Stajnia, Zamorsko II, w komorach Kołdrasa, Manna, Krystian, Stanetti, przy kieratach Gapłowy i Waryński oraz w szybiku Spalonym. Jedno z wyrobisk komorowych – komora Ważyn – ma charakter wyrobiska chodnikowego. Zaciska się z prędkością od -1,4 do -3,4 ‰/rok w poziomie i od -3,2 do -6,2 ‰/rok w pionie. W innych komorach konwergencja liniowa osiągała wartość od -0,6 do 5,5 ‰/rok.

Eksploatację w **Wapnie** rozpoczęto w 1920 r. Pomiary konwergencji prowadzono na poziomach 3, 4, 5, 6 i 7 w latach 1959-1962 z roczną częstotliwością. Proste stacje pomiarowe zakładane były przez S. Szpetkowskiego w chodnikach głównych wzdłuż osi W-E w 3 wspólnych płaszczyznach pionowych, w środku i przy brzegach pola. Mierzono konwergencje pionowe i poziome. Maksymalną wartość prędkości konwergencji poziomej zaobserwowano na poziomie 5 i wynosiła ona  $\xi'_s = -9,7$  ‰/rok. Maksymalna prędkość konwergencji pionowej wyniosła  $\xi'_h = -4,5$  ‰/rok (poziom 6). Poza konwergencją wykonywane były także pomiary pionowych przemieszczeń reperów na poszczególnych poziomach.

Pomiary konwergencji wprowadzono w kopalni **Kłodawa** po katastrofalnym zatopieniu kopalni w Wapnie w 1977 r. Początkowo obserwowano kilka baz komorowych w polu 1. Pod koniec lat dziewięćdziesiątych zaczęto eksploatację poniżej poziomu 600 m. Ponieważ dotąd nie było w polskim górnictwie solnym doświadczeń z ruchem górotworu na takich głębokościach, wyprzedzająco założono stacje i prowadzono pomiary konwergencji w wyrobiskach chodnikowych udostępniających głębsze poziomy (upadowe zejściowe nr 51 – 55 w polu 2). W 2001 r. przedłużono istniejący od 1980 pion pomiarowy ks11 w polu 2 do poziomu 690. W listopadzie 2002 r. pomiarami objęto pole 3, a w 2005 roku opomiarowano pole 5.

Konwergencja w wyrobiskach chodnikowych mierzona jest w polu 2 na poziomach 630, 660, 690, 720 i 750 m. O ile w Bochni i Wieliczce stacje pomiarowe składały się często z jednej tylko bazy, w Kłodawie zakładano stacje poszerzone. Znaki pomiarowe zastabilizowano w odległości 0, 1, 2, 3, 4 i 8 m od konturu wyrobisk w głąb górotworu. Wiele z tych baz uległo uszkodzeniu w związku z rozbudową pola 2 w tym rejonie. Pomiary przeprowadzano przy użyciu sztywnego konwergometru teleskopowego, konwergometru taśmowego lub dalmierza laserowego.

Prędkość względnej konwergencji liniowej w chodnikach jest zróżnicowana i zależy głębokości. Na najwyższym poziomie 630 konwergencja pionowa wynosi średnio -3,2 ‰/rok a pozioma -1,8 ‰/rok. Na najniższym poziomie 750 średnia konwergencja pionowa to -9 ‰/rok a pozioma -7,8 ‰/rok. Prędkość konwergencji jest prawie stała. Tendencję zmniejszania się prędkości w czasie obserwuje się w pomiarach konwergencji na skrzyżowaniach chodników.

W komorach kłodawskich mierzona jest konwergencja główna pionowa. Bazy poziome zakładane są przy spągu wyrobisk. W polu 1 konwergencja mierzona jest na kilku poziomach kopalni i jej prędkość wynosi od ok. -7 ‰/rok na poziomie 475 do ok. -23 ‰/rok na poziomie 600. W polu 2 prędkość konwergencji osiąga wartości od ok. -11 ‰/rok na poziomie 525 do ok. -15 ‰/rok na poziomie 690. W polu 3 i 5 prędkości konwergencji są niewielkie: od 0,1 do 1,2 ‰/rok.

Obserwacje konwergencji w tej kopalni stanowią wartościowy materiał poznawczy dokumentujący wzrost konwergencji z głębokością, związki konwergencji z czasem, rozkład konwergencji w strukturze wielopoziomowej kopalni, wpływ prowadzenia eksploatacji w pobliżu stacji konwergencyjnych, podobieństwo i zróżnicowanie konwergencji w poszczególnych polach górniczych. Dotyczy to przede wszystkim konwergencji w komorach i szczegółowy opis tych zjawisk pomija się w tej pracy.

Próby kompleksowych pomiarów konwergencji komór w kopalni **Solno w Inowrocławiu** podjęto w latach 80. XX wieku, krótko przed planowym zatopieniem kopalni. Zastosowano ciągi do pomiaru konwergencji pionowych między poziomem 1. a 7., stosując przeniesienie ruchu stropu do urządzenia odczytowego przy spągu drutami inwarowymi. Urządzenia te ulegały systematycznemu niszczeniu, a w związku z rozpoczęciem likwidacji kopalni pomiary przerwano. Z ustnych informacji wynika, że prędkość konwergencji wynosiła od -0,5 do -1,0 ‰/rok.

W kopalni soli **Siedlec**, po wydrążeniu chodników na głębokości 385 m założono dwie stacje poszerzone do pomiaru konwergencji: jedną w chodniku do komory nr 7 o wymiarach

2,5 m x 2,8 m, drugą w poprzeczni MOS, prostopadłej do chodnika nr 7, o wymiarach 3,4 m x 2,9 m. Znaki pomiarowe zastabilizowano na konturach chodników oraz na głębokości 2,5 i 5,0 m od konturów. W pobliżu stacji pomiarowych nie była prowadzona eksploatacja. Stacje usytuowano w pewnej odległości od skrzyżowań wyrobisk w celu zmniejszenia ich wpływów na wyniki pomiarów. Pomiary wykonywano od września 1993 r. do marca 1995 r., początkowo co 3 miesiące. Po przeszło dwóch latach od ostatniej obserwacji, tuż przed zamknięciem kopalni, wykonano jeszcze jedną obserwację.

Prędkość konwergencji względnej pionowej wynosi w całym okresie obserwacji od -3,6 do -4,0 ‰/rok. Konwergencja pozioma była bardziej zmienna w czasie i wynosiła od -1,8 do -5,7 ‰/rok.

Roboty górnicze w **Sieroszowicach** prowadzone są na głębokości 900 m równoległymi chodnikami, które mają w przyszłości łączyć szyb SW1 i oddalony o 5 km w linii prostej szyb SG. Chodniki mają przekrój zbliżony do prostokąta o szerokości 6,5–7,0 m i wysokości 5,0–5,5 m. Pomiary konwergencji prowadzone były w latach 1991–1995. Założono 3 stacje poszerzone, dwie w chodnikach i jedną w przecince między chodnikami. Repery powierzchniowe osadzono płytko na konturze wyrobiska a wgłębne w odległościach 2,5 i 5,0 m w głąb od konturu wyrobiska.

Prędkość konwergencji względnej wyraźnie zmniejsza się z upływem czasu. W początkowym okresie konwergencja pozioma wynosiła ok. -30 ‰/rok a pionowa -40‰/rok. W ciągu ostatnich 5 miesięcy pomiarów prędkość konwergencji poziomej miała wartość -9,0 ‰/rok a pionowej -10,0 ‰/rok.

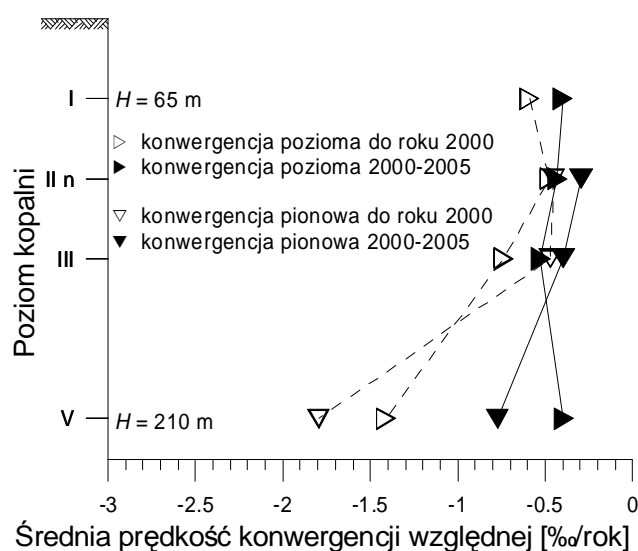
### **4.3. Omówienie wyników pomiarów konwergencji**

Po katastrofalnym zatopieniu kopalni soli Wapno w 1977 wprowadzono obowiązek prowadzenia pomiarów konwergencji we wszystkich podziemnych kopalniach soli. Stąd rozbudowa stacji pomiarowych pod koniec lat 70-tych ub. wieku. Głównym tego celem było uzyskanie danych o zaciskaniu wyrobisk i monitorowanie ewentualnego zwiększenia ruchu górotworu, a w kopalniach zabytkowych także w miejscach szczególnego zagrożenia dla przebywających tam ludzi. Takie założenia determinowały objawową interpretację uzyskanych wyników. Na ogół wyniki zestawiano w tabelach i na wykresach z krótkim opisem zauważonych krótkookresowych tendencji zmian prędkości konwergencji. Podobnie

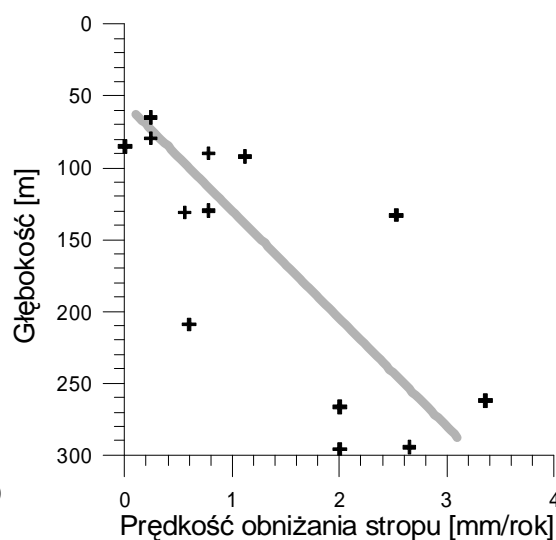
przedstawia się interpretację obecnie przeprowadzanych pomiarów [np. *Wykonanie pomiarów...2005, Analiza...2005*].

W **Wieliczce** dla uchwycenia powiązania konwergencji ze zróżnicowanymi warunkami geologiczno-górnictwymi założono ponad 500 baz rozmieszczonych na wielu poziomach, w różnych częściach kopalni. Ten cel nie został dotąd osiągnięty. Znaczny rozrzut wartości konwergencji skłonił interpretatorów tylko do próby całościowego ich statystycznego zestawienia [Bieniasz, Wojnar 2007]. Zauważono także tendencję zmniejszania się prędkości konwergencji w ostatnich latach.

Duże zróżnicowanie wyników jest konsekwencją przede wszystkim zróżnicowanej budowy złoża, nieregularnego rozmieszczenia wyrobisk, bliskiego sąsiedztwa komór, a także różnorodności wymiarów i kształtów wyrobisk. Warunki te są pomijane w analizie wyników. Generalnie, wartości prędkości względnych konwergencji liniowych są powiązane z głębokością i zagęszczeniem wyrobisk. W tabeli 4.2 pokazano przegląd charakterystycznych wyników pomiarów konwergencji chodników i obliczone wartości konwergencji względnych i ich prędkości. Ilustracją tabeli jest rys. 4.1. Wskazać można na tendencję wzrostu konwergencji z głębokością (rys. 4.1) – podobnie jak obniżen stropu (rys. 4.2) – oraz na mniejsze w ostatnim cyklu pomiarowym prędkości konwergencji (rys. 4.1).



Rys. 4.1. Średnie prędkości konwergencji względnej na różnych poziomach kopalni w Wieliczce

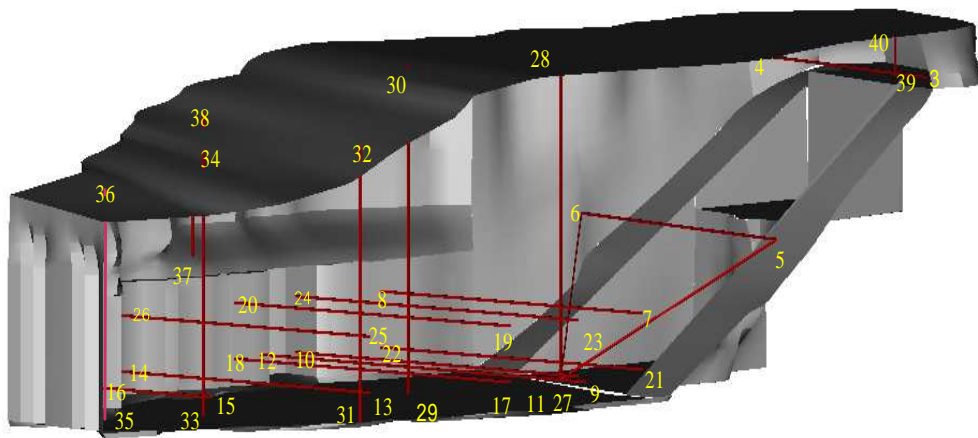


Rys. 4.2. Zależność prędkości obniżania stropu od głębokości w kopalni wielickiej

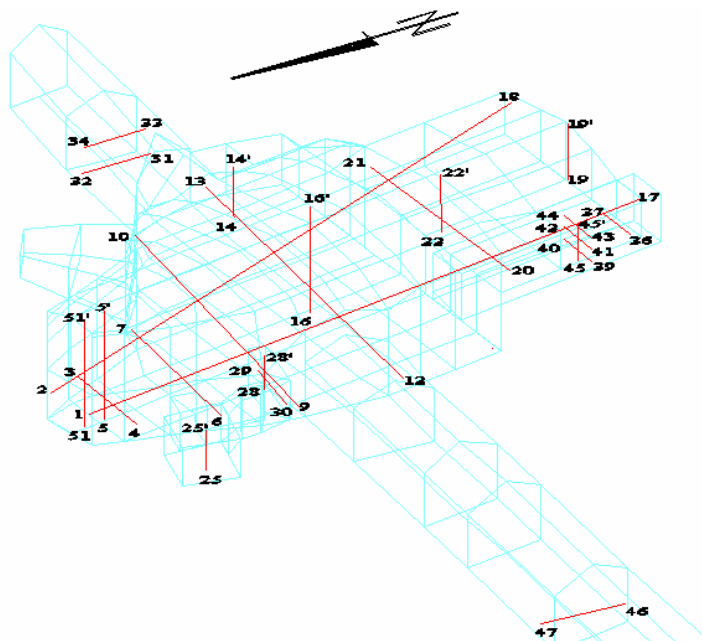
Tabela 4.2. Konwergencja w chodnikach kopalni soli w Wieliczce

Poziom	Wartość	Konwergencja bezwzględna [mm]				Konwergencja względna [%]				Prędkość konwergencji względnej [%/rok]			
		Bazy poziome		Bazy pionowe		Bazy poziome		Bazy pionowe		Bazy poziome		Bazy pionowe	
		do roku 2000	2000- 2005	do roku 2000	2000- 2005	do roku 2000	2000- 2005	do roku 2000	2000- 2005	do roku 2000	2000- 2005	do roku 2000	2000- 2005
I (1 baza)	średnia	-30,50	-8,00			-7,63	-2,00			-0,59	-0,40		
	min	-30,50	-8,00			-7,63	-2,00			-0,59	-0,40		
	max	-30,50	-8,00			-7,63	-2,00			-0,59	-0,40		
II n (16 baz)	średnia	-13,56	-4,63	-11,37	-2,86	-6,37	-2,20	-5,66	-1,50	-0,47	-0,43	-0,45	-0,29
	min	-28,90	-15,40	-40,80	-9,00	-14,45	-5,92	-22,67	-5,00	-1,11	-1,17	-1,75	-0,98
	max	10,20	0,00	10,80	1,00	5,10	0,00	5,68	0,43	0,35	0,00	0,40	0,09
III (25 baz)	średnia	-20,36	-5,07	-17,15	-4,83	-10,55	-2,79	-6,91	-1,98	-0,74	-0,53	-0,47	-0,40
	min	-107,10	-16,10	-59,30	-19,80	-53,55	-10,06	-24,71	-8,25	-3,51	-1,98	-1,62	-1,65
	max	8,30	2,40	20,20	6,40	4,15	1,20	8,42	2,21	0,27	0,24	0,59	0,44
V (5 baz)	średnia	-46,66	-3,80	-32,70	-8,05	-21,69	-2,01	-16,35	-3,92	-1,41	-0,40	-1,80	-0,77
	min	-106,60	-6,00	-32,70	-14,00	-52,61	-3,33	-16,35	-7,00	-3,23	-0,66	-1,80	-1,38
	max	-6,60	-2,40	-32,70	-2,10	-3,67	-1,20	-16,35	-0,84	-0,26	-0,24	-1,80	-0,17
Łącznie	średnia	-22,95	-4,91	-15,37	-4,37	-11,04	-2,52	-6,96	-2,01	-0,77	-0,48	-0,56	-0,40
	min	-107,10	-16,10	-59,30	-19,80	-53,55	-10,06	-24,71	-8,25	-3,51	-1,98	-1,80	-1,65
	max	10,20	2,40	20,20	6,40	5,10	1,20	8,42	2,21	0,35	0,24	0,59	0,44

Inny cel miało zakładanie w jednym wyrobisku kilkunastu baz pomiarowych. Tak obserwowane są na przykład Kaplice Św. Kingi w kopalniach Wieliczka i Bochnia. Układ baz wskazuje na próbę rozpoznania zjawiska zaciskania w ramach pojedynczego wyrobiska. W kapicy wielickiej założono 16 baz pionowych, 14 poziomych i 2 bazy skośne (rys. 4.3). Bryła kaplicy wielickiej jest bardziej zwarta. Bazy pionowe założono w osi wyrobiska i przy ociosach. Znaki baz poziomych zastabilizowano na dwóch wysokościach – ok. 1,5 m nad spągiem i mniej więcej w połowie wysokości komory.



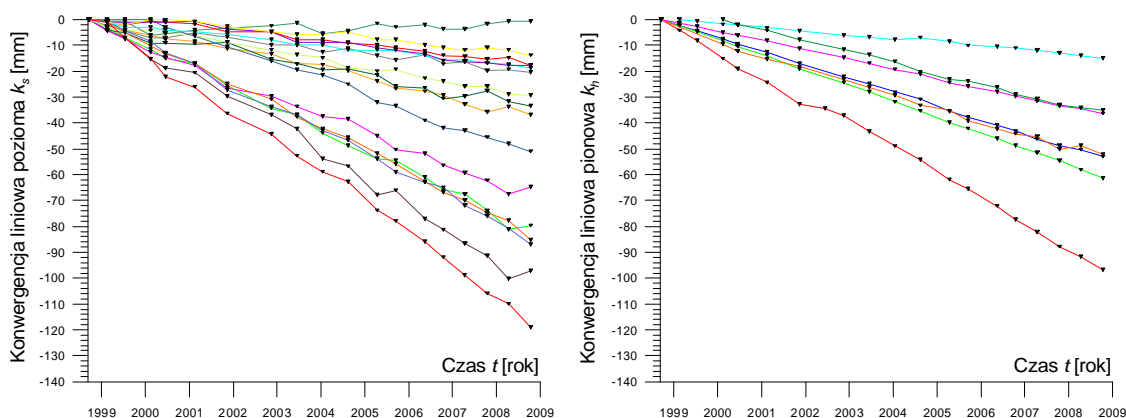
Rys. 4.3. Lokalizacja baz w Kaplicy Św. Kingi w Wieliczce [Kortas 2001]



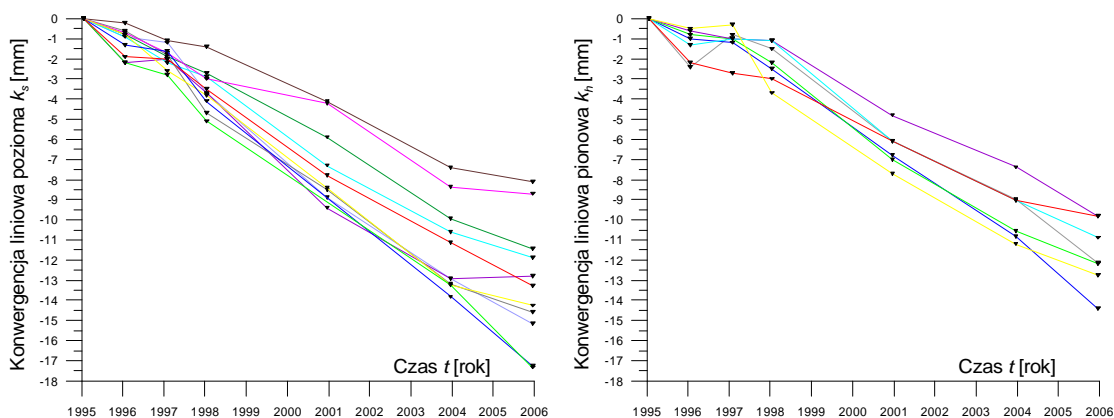
Rys. 4.4. Lokalizacja baz w Kaplicy Św. Kingi w Bochni [Kortas 2001]

Kaplica bocheńska jest bardziej rozczłonkowana i dużo niższa niż wielicka. Pionowe, poziome i skośne bazy rozmieszczone są w całej bryle komory, włączając w to zakrystię, ambonę, chór, chodnik pod chórem, a także chodniki dojściowe do kaplicy (rys. 4.4). Ogółem obserwowanych jest 34 baz pomiarowych z półroczną częstotliwością pomiaru.

Generalnie w obu kaplicach obserwuje się prawie stałe prędkości zaciskania (rys. 4.5 i 4.6). Dzięki takiemu rozmieszczeniu baz możliwe było oszacowanie konwergencji objętościowej tych wyrobisk:  $-0,3\%$  /rok w Wieliczce i  $-2,5\%$  /rok (ośmiokrotnie więcej) w Bochni [Kortas 2004].



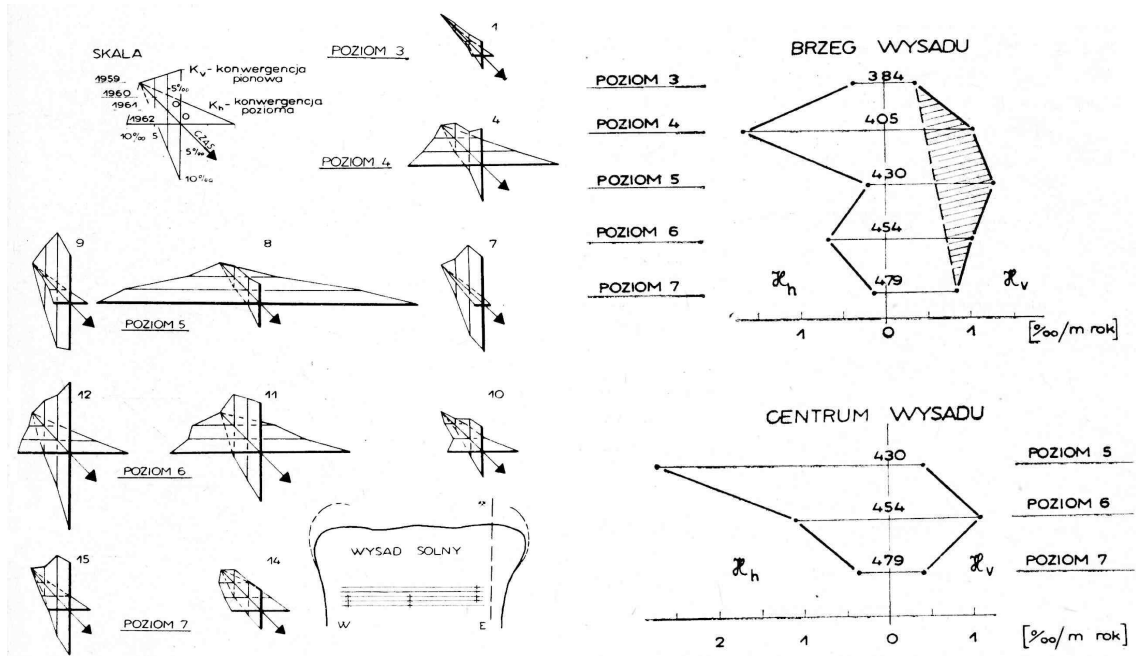
Rys. 4.5. Konwergencja pozioma i pionowa w Kaplicy Św. Kingi w Bochni



Rys. 4.6. Konwergencja pozioma i pionowa w Kaplicy Św. Kingi w Wieliczce

Pomiary konwergencji w Wapnie miały na celu oszacowanie obciążenia filarów kopalni na brzegach i w środku struktury kopalni. Proste stacje pomiarowe zakładane były w głównych chodnikach na poszczególnych poziomach w centrum kopalni i na jej obrzeżach. Chociaż otrzymane wyniki (rys. 4.7) są trudno interpretowalne, w analizach ruchu górotworu łączono otrzymany rozkład przestrzenny konwergencji z kolejnością powstawania wyrobisk.

Interpretując wyniki pomiarów uważano, że rozkład konwergencji na brzegu i w środku pola górniczego wskazuje na wykształcanie się makrosklepienia nad obszarem eksploatacji, z obciążeniem filarów brzeżnych i odciążeniem centralnej części kopalni, co tłumaczyło różnicowanie konwergencji poziomej i pionowej [Kortas 1979].



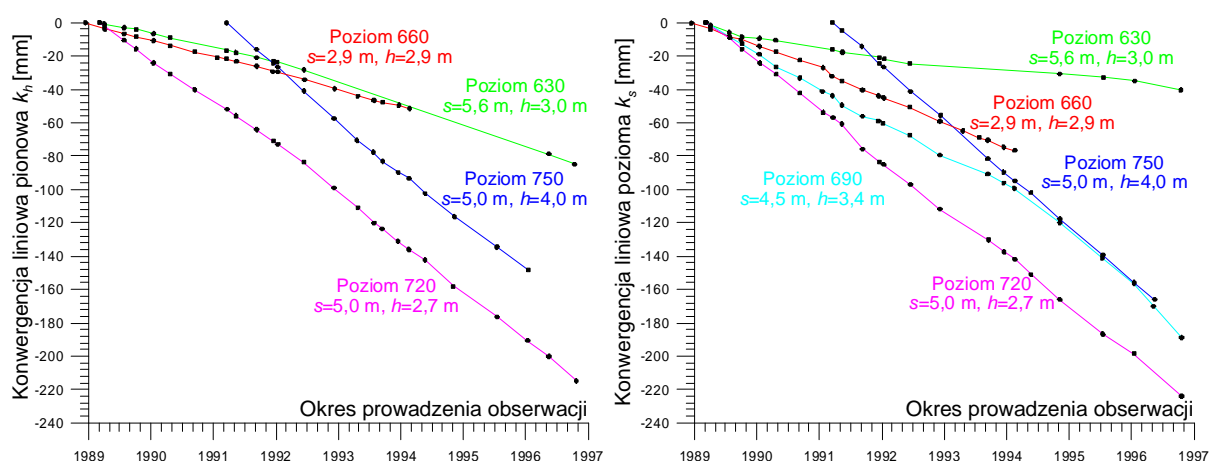
Rys. 4.7. Konwergencja w Wapnie [Kortas 1979]

W Kłodawie zapoczątkowano – kontynuowane później w kopalniach Siedlec i Sieroszowice – zakładanie poszerzonych stacji pomiarowych. Znaki stabilizowano w górotworze w różnych odległościach od konturu wyrobiska. Celem takiego rozmieszczenia baz było określenie deformacji górotworu w otoczeniu wyrobiska dla oszacowanie właściwości geomechanicznych górotworu. W latach 90. XX w. powstało jednak wiele komór w tym rejonie i stacje znalazły się w obszarze wpływów eksploatacji. Przybierki konturu chodników doprowadziły do zniszczenia szeregu baz. W tabeli 4.3 podano liczbę baz mierzonych obecnie w kopalni Kłodawa w pionie pochylni 51-55.

Prędkość konwergencji pionowych na poszczególnych poziomach jest generalnie stała (rys. 4.8) i wynosi od  $-3,1$  ‰/rok na poziomie 630, przez  $-5,7$  ‰/rok na poz. 660 do  $-11,1$  ‰/rok na poz. 720. Widoczny jest więc wzrost prędkości konwergencji z głębokością. Mniejsza wartość prędkości konwergencji na najniższym poziomie  $\xi_h^i = -7,2$  ‰/rok wynikała z wpływu nadległych wyrobisk, powodujących odprężenie tej części górotworu.

Tabela 4.3. Ilość baz obserwowanych obecnie w pionie pochylni 51-55

Poziom	Odległość stabilizacji znaków pomiarowych od konturu chodnika					
	0 m	1 m	2 m	3 m	4 m	8 m
630	4	1	1	1	1	1
	5	1	1	1	1	1
660	zn.	2	2	1	1	1
	zn.	3	3	1	1	1
690	zn.	zn.	zn.	zn.	zn.	zn.
	5	2	2	1	1	1
720	zn.	2	2	1	1	1
	zn.	3	3	1	1	1
750	4	2	2	1	1	1
	6	3	3	1	1	1
zn. – bazy zniszczone						

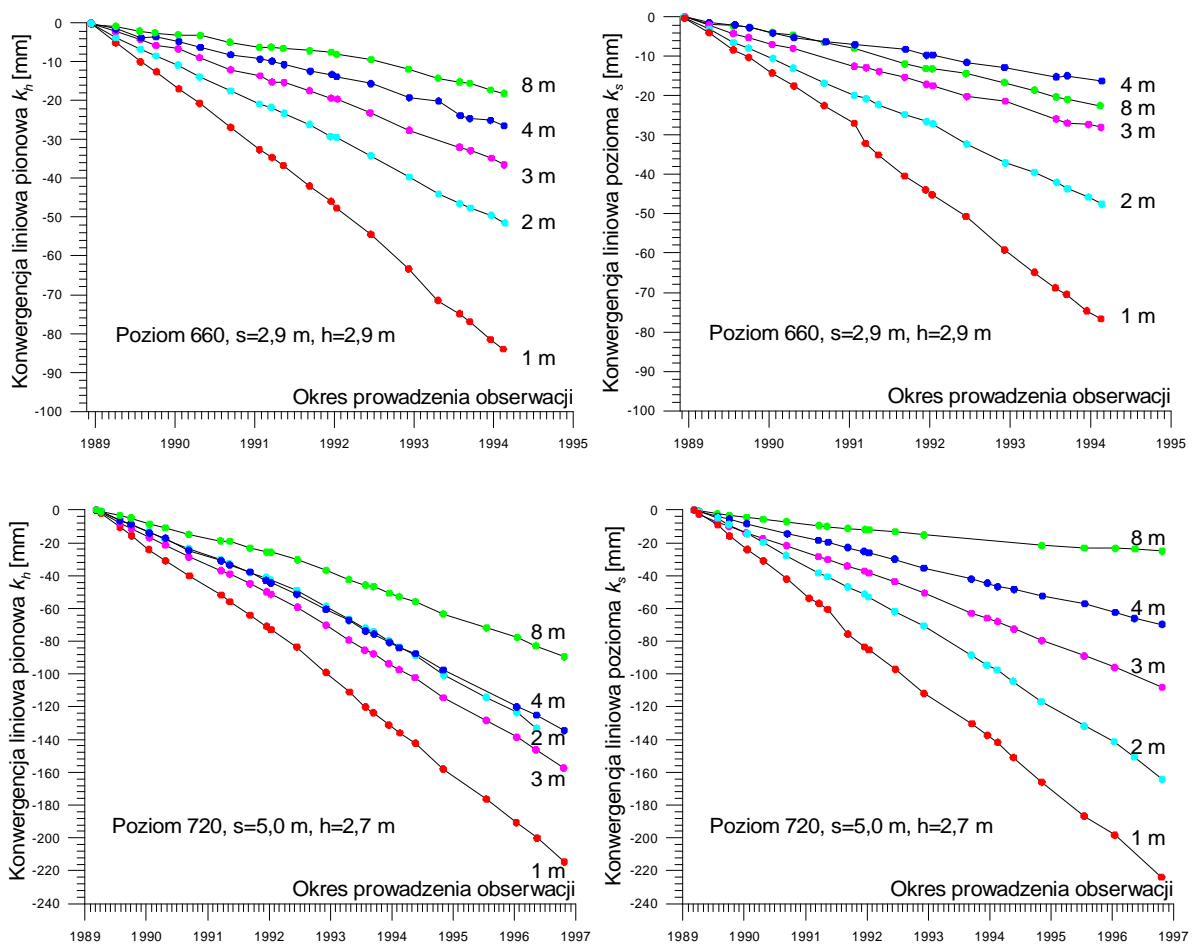


Rys. 4.8. Zależność pionowej i poziomej konwergencji liniowej od czasu w kopalni Kłodawa

Zestaw czterech wykresów (rys. 4.9) ilustruje zachowanie się górotworu w otoczeniu chodników na poziomach 660 i 720. Prędkość konwergencji jest stała tak dla poziomych, jak i pionowych baz. Wartości konwergencji pionowej i poziomej chodnika o jednakowych wymiarach pionowym i poziomym na poz. 660 są sobie równe. Na poz. 720 prędkość względnej konwergencji pionowej wynosi  $-11,1\text{ ‰/rok}$  a poziomej  $-6,0\text{ ‰/rok}$ .

Z różnicy przemieszczeń czy konwergencji pomiędzy punktami odległymi o 1 m i 8 m od konturu wyrobiska określić można średnie odkształcenia górotworu w sąsiedztwie chodnika. Odkształcenia nad stropem wynoszą  $+2,7\text{ ‰/rok}$ , a za ociosami  $+1,9\text{ ‰/rok}$ . Większe odkształcenia w stropie i spągu w porównaniu z odkształceniami w ociosach są konsekwencją kształtu chodnika z przewagą wymiaru poziomego nad pionowym.

Główne badania konwergencji w kopalni kłodawskiej dotyczą zachowania się wielopoziomowej komorowo-filarowej struktury pól eksploatacyjnych 1, 2, 3 i 5. Również z oddziaływaniem tych pól powiązane są konwergencje obserwowane na skrzyżowaniach chodników w bliskim sąsiedztwie komór. Analizy wyników tych obserwacji, które powinny uwzględniać przestrzenny kształt tych pól przedstawiane są w sprawozdaniach z przeprowadzonych pomiarów [Analiza... 2002, 2003, 2004]. Wyniki obserwacji w kopalni w Kłodawie były podstawą do interpretacji ruchu górotworu w otoczeniu wyrobisk. Pokazano, że zależność konwergencji w polu 2 od czasu jest funkcją potęgową [Kortas 2008]. W oparciu o wyniki pomiarów konwergencji wyznaczono parametry reologiczne górotworu kłodawskiego [Analiza... 1997].



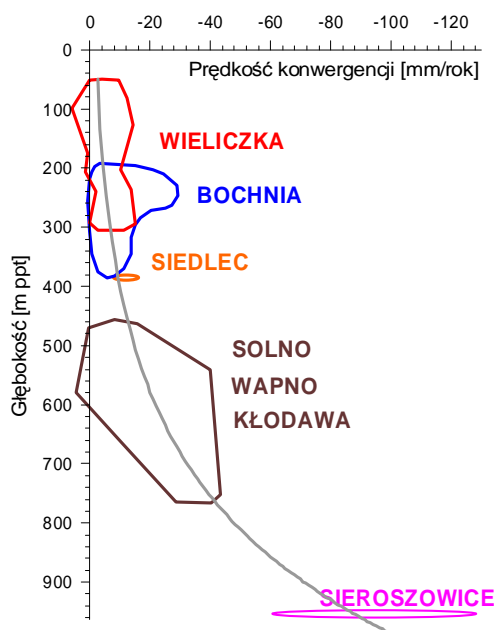
Rys. 4.9. Porównanie pionwej i poziomej konwergencji liniowej dla poszerzonej stacji na poziomie 660 i 720

Główne badania konwergencji w kopalni kłodawskiej dotyczą zachowania się wielopoziomowej komorowo-filarowej struktury pól eksploatacyjnych 1, 2, 3 i 5. Również z oddziaływaniem tych pól powiązane są konwergencje obserwowane na skrzyżowaniach

chodników w bliskim sąsiedztwie komór. Analizy wyników tych obserwacji, które powinny uwzględniać przestrzenny kształt tych pól przedstawiane są w sprawozdaniach z przeprowadzonych pomiarów [Analiza... 2002, 2003, 2004]. Wyniki obserwacji w kopalni w Kłodawie były podstawą do interpretacji ruchu górotworu w otoczeniu wyrobisk. Pokazano, że zależność konwergencji w polu 2 od czasu jest funkcją potęgową [Kortas 2008]. W oparciu o wyniki pomiarów konwergencji wyznaczono parametry reologiczne górotworu kłodawskiego [Analiza... 1997].

W kopalni Siedlec również zakładane były poszerzone stacje pomiarowe w celu rozpoznania właściwości geomechanicznych górotworu. Dwie stacje pomiarowe założono w chodnikach prostopadłych do siebie celem uchwycenia ewentualnego zróżnicowania kierunkowego odkształceń [Sprawozdanie... 1994]. Po dwóch latach obserwacje przerwano ze względu na rozpoczęcie likwidacji kopalni. Na podstawie wyników pomiarów konwergencji podjęto próbę określenia właściwości reologicznych górotworu w pracy [Maj 2007a, b].

Analizy wyników konwergencji z reguły przeprowadzane są dla poszczególnych wyrobisk i pól górniczych. Interpretacje w oparciu o wyniki pomiarów z wielu kopalń soli przedstawiane są w nielicznych publikacjach dopiero w ostatnich latach [Kortas 2004, 2008]. W pracy Bieniasza i Wojnara [2007] przedstawiono zróżnicowanie prędkości konwergencji w polskich kopalniach soli (rys. 4.10).



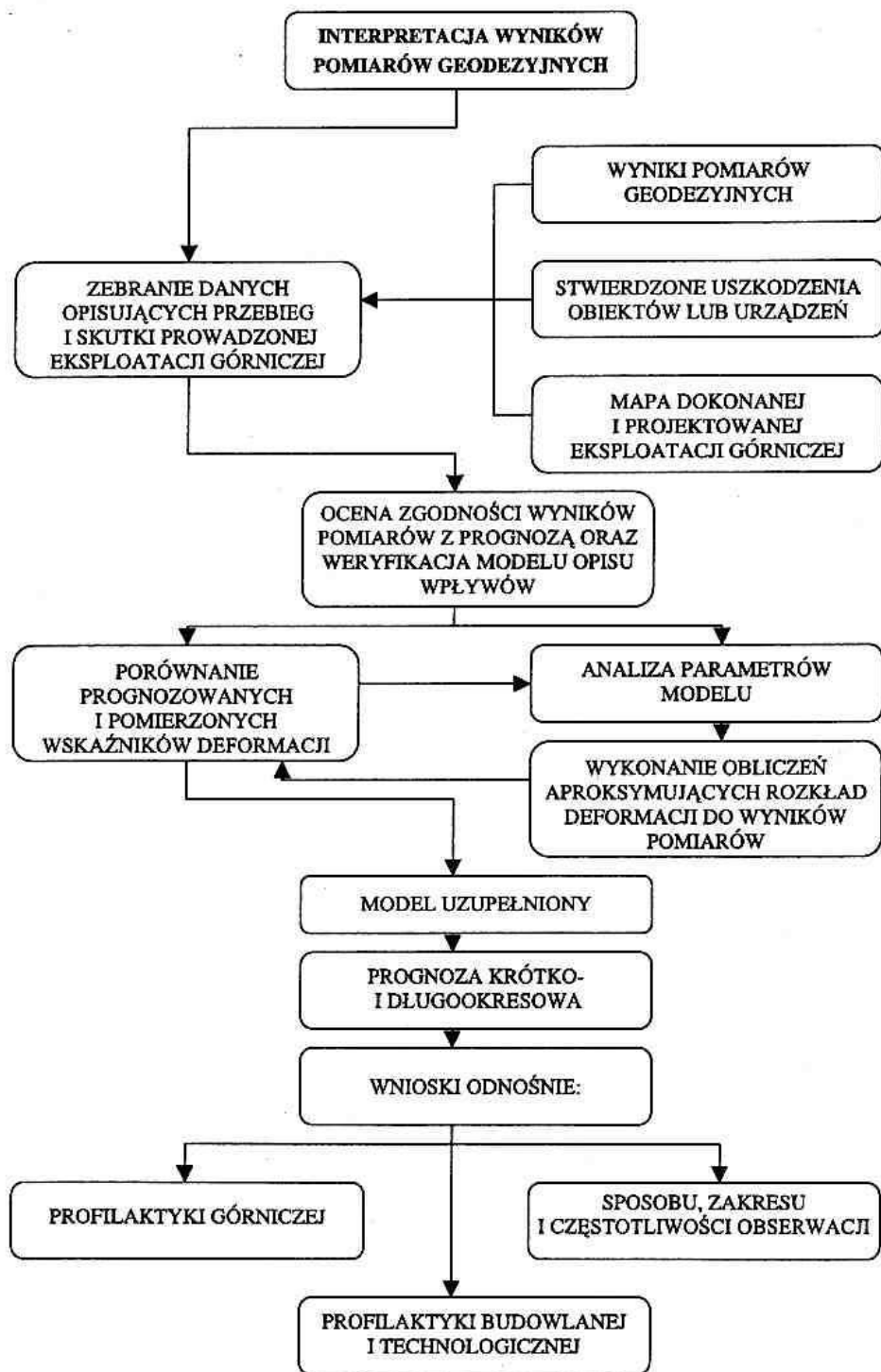
Rys. 4.10. Zależność prędkości konwergencji od głębokości [Bieniasz, Wojnar 2007]

Przytoczone tu opisy wyników pomiarów pochodzą głównie z opracowań wykonywanych na zlecenie poszczególnych Kopalń, w celu uchwycenia tendencji lokalnego ruchu górotworu i jej zmian. Autorzy opracowań zwracają uwagę także na duże zróżnicowanie wartości konwergencji mierzonych w różnych kopalniach. Choć w analizach nie uwzględnia się wpływu wymiarów wyrobisk i warunków geologiczno – górniczych wskazują na przejawy tendencji wzrostu konwergencji z głębokością (rys. 4.10).

Niezwykle istotnym czynnikiem wpływającym na jakość interpretacji wyników pomiarów jest współpraca mierniczego z innymi specjalistami na każdym etapie wykonywanych prac. Jak pisze Cacoń: *Z doświadczeń autora związanych z oceną wiarygodności pomiarów deformacji ... wynika, że współpraca ta z różnych powodów nie zawsze jest właściwa. Wiąże się to albo ze zbytym zawierzeniem przez geodetę własnej intuicji i nie korzystania z usług innych specjalistów, albo specjaliści ci nie posiadają odpowiedniej wiedzy o badanym obiekcie* [Cacoń 2001]. Te trafne uwagi dotyczą także pomiarów konwergencji i ich interpretacji.

Ogólne zasady postępowania przy interpretacji wyników pomiarów geodezyjnych podał Pielok dla problemu wpływu eksploatacji na górotwór i powierzchnię [Pielok 2002]. W tym schemacie (rys. 4.11) zasadą poprawnej interpretacji jest budowa modelu, odnoszenie wyników do tego modelu i ewentualna weryfikacja modelu. Stanowi to podstawę do dalszych czynności interpretacyjnych i formułowania wniosków z obserwacji.

Kluczową rolę odgrywa w takim postępowaniu przyjęty model. Może to być wzór lub cała konstrukcja obejmująca układ szeregu założeń, wykorzystująca złożony aparat matematyczny i interpretacyjny. Przykładem prostych formuł opisujących związek konwergencji z czasem dla oceny stanu i prognozy dalszego zaciskania przedstawiono w pracy Kortasa [2004]. Wskazano tam na możliwość stosowania funkcji liniowej, wykładniczej lub potęgowej do tych celów oraz zaproponowano – oparty na wynikach pomiaru konwergencji i zależny od przyjętej funkcji – *wskaźnik zaciskania* wyrażony czasem połowicznego zaciśnięcia wyrobiska. Budowa złożonych modeli zachowania się górotworu otaczającego zaciskane wyrobisko wymaga znajomości właściwości fizycznych górotworu i zasad matematycznego ich odwzorowywania w symulacjach komputerowych.



Rys. 4.11. Schemat postępowania przy interpretacji pomiarów geodezyjnych [Pielok 2002]

## 4.4. Podsumowanie i wnioski

W rozdziale 4 przedstawiono wyniki pomiarów konwergencji w polskich kopalniach podziemnych. Wyróżniono kilka celów wykonywania pomiarów konwergencji:

- obserwacja tendencji zaciskania wyrażonej zmianami prędkości konwergencji,
- uchwycenie zróżnicowania wskaźników zaciskania w całej przestrzeni kopalni (Wieliczka),
- rozpoznanie zróżnicowanego zaciskania w obrębie jednego wyrobiska (Wieliczka, Bochnia),
- oszacowanie obciążenia filarów na zewnątrz i w centrum kopalni (Wapno),
- określenie deformacji górotworu w otoczeniu wyrobiska (Kłodawa, Siedlec, Sieroszowice),
- określenie oddziaływania zespołu komora – filar w obrębie wielopoziomowego komorowo – filarowego pola górniczego (Kłodawa).

Obserwowane w polskich kopalniach soli prędkości względnej konwergencji są znacznie zróżnicowane. Ich wartości wynoszą od 0 ‰/rok w Wieliczce do -10 ‰/rok w Sieroszowicach, generalnie rosnąc z głębokością. Obserwowano także konwergencje przekraczające ten przedział. W warunkach odprężonego górotworu pojawiały się także wartości dodatnie konwergencji, a na dużych głębokościach, bezpośrednio po wydrążeniu chodnika prędkość konwergencji dochodziła nawet do -40 ‰/rok.

Przeprowadzona analiza wykazała, że prowadzone w kopalniach soli pomiary konwergencji służą przede wszystkim opisowi lokalnego ruchu górotworu. Skierowane one były głównie na określenie bezpieczeństwa wyrobiska lub rejonu kopalni zakładając, że wzrost prędkości konwergencji jest niekorzystny dla bezpieczeństwa obserwowanego rejonu. Interpretacja wyników pomiarów opiera się wyłącznie na opisie zestawień liczbowych lub wykresów zaciskania z pominięciem aktualnego stanu wiedzy o zachowaniu się górotworu solnego.

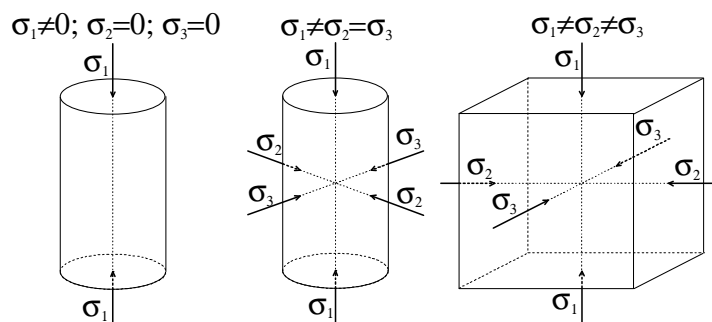
## 5. Zachowanie się górotworu solnego – stan wiedzy

Górotwór solny jest specyficznym ośrodkiem o wybitnych właściwościach reologicznych. Właściwości te rozpoznaje się przede wszystkim metodami laboratoryjnymi. Coraz częściej jednak także poprzez obserwacje *in-situ*, do których należą badania przemieszczeń i odkształceń, w tym konwergencji. Właściwości badanego ośrodka wykorzystuje się w obliczeniach naprężeń, przemieszczeń i odkształceń np. wokół wyrobisk. Właściwości otrzymane w laboratorium można opisać wieloma prawami reologicznymi. Konfrontacja tych założeń z pomiarami weryfikuje przyjęte prawo reologiczne. Doświadczenie wynikające z dotychczasowych badań stanowić będzie podstawę do sformułowania modelu konwergencji.

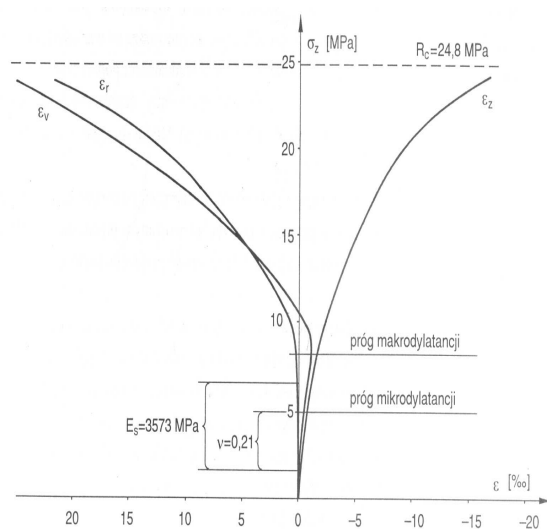
### 5.1. Zachowanie się soli kamiennej na podstawie testów laboratoryjnych i badań *in-situ*

Podstawowymi **testami laboratoryjnymi** są testy ściskania w jedno- i trójosiowym stanie naprężeń (rys. 5.1). Gdy do próbki przyłożone zostało obciążenie tylko w kierunku podłużnym, przyjmuje się, że w środku próbki panuje jednoosiowy stan naprężenia, tzn., że  $\sigma_1 \neq 0$ ,  $\sigma_2 = 0$ ,  $\sigma_3 = 0$ , przy czym kierunek  $\sigma_1$  jest kierunkiem podłużnym. Jeżeli do próbki przyłożone zostanie dodatkowo ciśnienie w kierunku poprzecznym w środku próbki wystąpi trójosiowy stan naprężenia, przy czym  $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$ . Tzw. prawdziwy trójosiowy stan naprężenia, w którym  $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ , uzyskiwany jest niezwykle rzadko, na przykład w sześciennych próbkach solnych [Hunsche 1991, 1993].

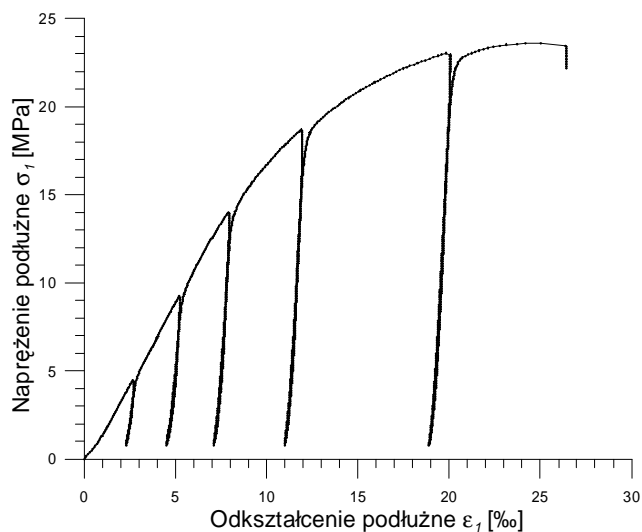
Rozróżnia się badania krótko- i długotrwałe. W badaniach krótkotrwałych zakłada się, że czas nie wpływa na otrzymane wyniki. Takie testy nie przekraczają jednej godziny. Na ich podstawie określa się wartości większości parametrów odkształceniowych i wytrzymałościowych: modułu Younga  $E$ , współczynnika Poissona  $\nu$ , wytrzymałości doraźnej na rozciąganie  $R_r$  i ściskanie  $R_c$ . Na rys. 5.2 pokazano przykład charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej próbki soli, a na rys. 5.3 charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowe podczas ściskania jednoosiowego z odprężaniem.



Rys. 5.1. Próbkę w jedno- i trójosiowym oraz w tzw. prawdziwym trójosiowym stanie naprężenia



Rys. 5.2. Charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowe próbki soli kamiennej [Flisiak i in. 1997]



Rys. 5.3. Charakterystyka naprężeniowo-odkształceniowa z odprężaniem [Ocena geomechaniczna... 1999]

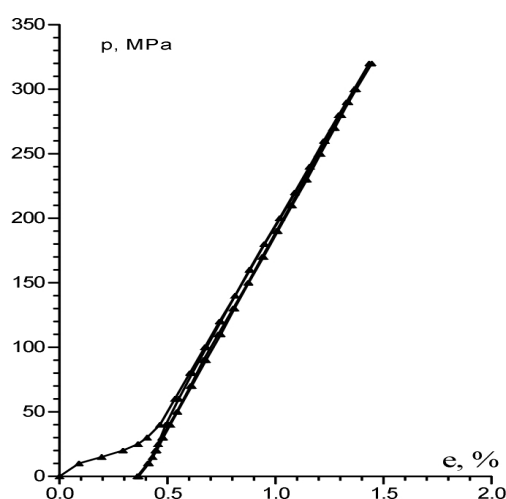
W testach jednoosiowego ściskania występuje duże zróżnicowanie wyników, ponieważ uwidaczniają się w nich wszelkie defekty materiału powstałe podczas uzysku rdzenia wiertniczego i przygotowania próbek [Ślizowski 2006]. Bardziej wiarygodne są testy trójosiowe, których rodzaj zależy od sposobu obciążenia próbki: podłużnego, poprzecznego lub obu jednocześnie. Eksperyment przeprowadzi się ze stałym przyrostem naprężeń lub odkształceń.

Analiza wyników ściskania próbek soli kamiennej w komorze trójosiowej pozwala na sformułowanie następujących spostrzeżeń [Charakterystyka... 1994, Kryteria... 1999]:

- w fazie obciążeń hydrostatycznych następuje zmniejszenie objętości badanych próbek;
- w miarę wzrostu ciśnienia otaczającego rośnie wartość naprężeń niszczących;

- w miarę wzrostu ciśnienia otaczającego względny przyrost objętości próbki pojawia się przy coraz większych wartościach naprężeń osiowych;
- ciśnieniom okólnym o wartościach do 10 MPa towarzyszy wyraźne, kruche zniszczenie soli, objawiające się prawie całkowitą dezintegracją struktury próbki, przy wyższych ciśnieniach próbki na ogół nie ulegają rozpadowi a zniszczenie przejawia się utratą podporności i gwałtownym wzrostem prędkości odkształceń, niekiedy obserwuje się wyraźne ścięcie o kierunku zgodnym z układem warstw.

Badania nad zachowaniem się próbek soli prowadzone są w Polsce przede wszystkim w laboratoriach AGH, UW, Chemkopu i Cuprum. Jednym z nietypowych testów, wykonanych w laboratorium IMG PAN były badania próbek soli w wysokich ciśnieniach. Próbka ściskana była w dwóch cyklach do wartości ciśnienia 330 MPa, odpowiadającej naprężeniom w górotworze na głębokości 15 km. Na początku cyklu pierwszego pojawiły się odkształcenia odpowiadające zamykaniu się spękań – trwałe odkształcenia, zanikające już w drugim cyklu obciążenia. Powrót pierwszego cyklu i cały cykl drugi dawały praktycznie pokrywające się proste. Materiał po zamknięciu spękań zachowywał się w takim razie liniowo sprężysto (rys. 5.4). Powtórzenia eksperymentów na kilku próbkach i pomiar dwiema różnymi metodami odkształceń dawały podobne wyniki [Ocena geomechaniczna... 1999]. Badania te potwierdziły poprawność stosowania prawa Hooke'a w zakresie odkształceń objętościowych.

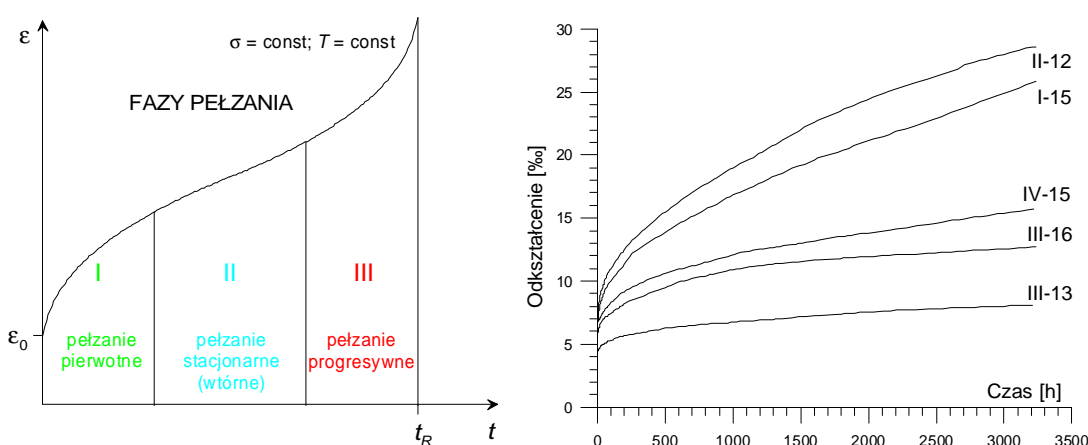


Rys. 5.4. Zależność między odkształceniem objętościowym a ciśnieniem hydrostatycznym dla soli kamiennej Góra [Ocena geomechaniczna... 1999]

Charakterystyczną cechą górotworu solnego są właściwości reologiczne, czyli istotny wpływ czasu na jego zachowanie się pod obciążeniem. Właściwości reologiczne uwidaczniają

się zjawisku pełzania (przyrost odkształceń w czasie przy stałej wartości obciążeń) i relaksacji (spadek naprężeń przy stałej w czasie wartości odkształceń). Eksperymenty takie trwają od kilku godzin do kilku lat.

W procesie pełzania soli kamiennej przyjmuje się, że występują trzy stadia przebiegu tego procesu (rys. 5.5). W stadium rozwoju pełzania (pełzanie pierwotne) deformacja zachodzi z malejącą prędkością. W stadium pełzania stacjonarnego prędkość odkształceń jest stała w czasie, przy czym prędkość jest wprost proporcjonalna do obciążenia. Jeżeli naprężenie jest większe od granicznego, pojawia się trzecia faza pełzania progresywnego, prowadzącego do zniszczenia próbki.



Rys. 5.5. Teoretyczne fazy pełzania soli i wyniki oznaczeń badań trójosiowego pełzania próbek soli [Ocena możliwości... 2003]

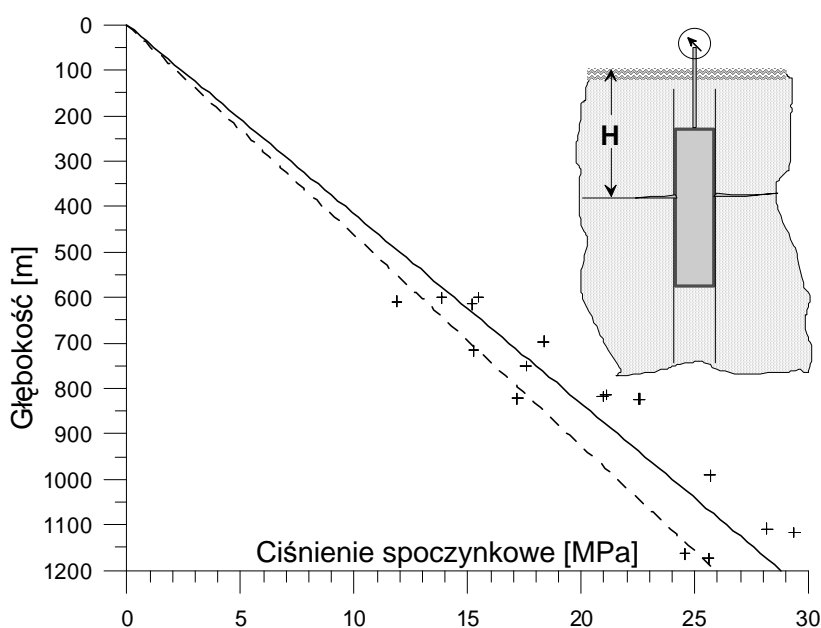
Na proces pełzania soli wpływa wiele czynników, do których zalicza się obciążenie, temperaturę i wilgotność. Prędkość pełzania wzrasta wraz ze wzrostem obciążenia a związek między naprężeniem a prędkością odkształcania nie jest zależnością liniową [Badania... 2005]. Według Mirzy [1981] jest funkcją potęgową czasu. Wyniki testów pełzania pokazane na rys. 5.5 również opisano funkcjami potęgowymi [Ocena możliwości... 2003].

Źródłem informacji o właściwościach górotworu solnego są badania *in situ* [np. Dreyer 1972]. W związku ze składowaniem w wyrobiskach solnych odpadów radioaktywnych w wielu krajach prowadzone były kompleksowe badania w górotworze solnym. Ogólnie dostępna jest część wyników badań przeprowadzonych w ramach projektu WIPP (Waste Isolation Pilot Plant) w USA, opublikowanych pod koniec lat 90. ubiegłego wieku. Obejmowały one między innymi obserwację zachowania się otworów wiertniczych oraz wyrobisk i filarów w nienaruszonym eksploatacją górotworze, a w szczególności zachowanie

się górotworu pod wpływem wysokich temperatur. Podobne badania prowadzone były na przykład w RFN i Francji, a dotąd nie były prowadzone w Polsce.

Liczne badania w górotworze solnym, przede wszystkim w ramach projektu WIPP, wskazują na występowanie w górotworze solnym hydrostatycznego stanu naprężeń pierwotnych [Munson 1997]. Dla potrzeb technologicznych w otworowych kopalniach soli, w szczególności dla podziemnych magazynów paliw, przeprowadza się testy mikroszczelinowania. Ich wyniki pozwalają na określenie naprężeń pierwotnych w górotworze solnym.

Test mikroszczelinowania opisuje Amadei i Stephansson [1997], a dla warunków solnych np. Kunstman i in. [2002]. Celem tego testu jest ustalenie gradientu mikroszczelinowania, czyli przyrostu ciśnienia w interwale 1 m. Przyjmuje się, że uzyskana w takim teście wartość ciśnienia spoczynkowego – niższego od maksymalnego ciśnienia szczelinowania, przy którym następuje inicjacja pęknięcia skał – odpowiada wartości pierwotnych naprężeń hydrostatycznych. Przykładem są wyniki testów mikroszczelinowania w kopalniach Góra i Mogilno (rys. 5.6). Krzyżyki przedstawiają wyniki pomiarów, linią ciągłą pokazano średnie ciśnienie spoczynkowe na różnych głębokościach, linia przerywana pokazuje ciśnienie obliczone na podstawie przyjmowanej w symulacjach gęstości górotworu solnego  $\rho = 2200 \text{ kg/m}^3$  w funkcji głębokości. Rozrzut otrzymanych wartości ciśnienia spoczynkowego wynika głównie ze zróżnicowania warunków geologicznych.



Rys. 5.6. Wpływ głębokości na ciśnienie spoczynkowe

Hydrostatyczny stan naprężeń pierwotnych oznacza, że wartości naprężeń głównych są sobie równe i zależą od głębokości oraz ciężaru właściwego górotworu, co można zapisać wzorem:

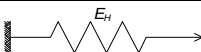
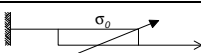
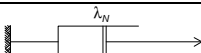
$$p_1 = p_2 = p_3 = -Hg\rho. \quad (5.1)$$

Taki stan przyjmowany jest obecnie w analizach zachowania się górotworu solnego [np. Kortas 2008, Ślizowski 2006].

## 5.2. Modele fizyczne stosowane w geomechanice solnej

Testy laboratoryjne prowadzą do określenia właściwości skał i sformułowania zależności między naprężeniem a odkształceniem w postaci praw konstytutywnych. Prawo konstytutywne (równanie stanu) opisujące model to równanie wiążące ze sobą tensory naprężeń i odkształceń oraz ich pochodne względem czasu. Podawane jest ono zwykle w formie dwóch równań, z których jedno wiąże ze sobą aksjatory naprężeń i odkształceń i wyraża prawo zmiany objętości, a drugie wiąże ze sobą dewiatory i wyraża prawo zmiany postaci. Sprowadzając opis tych związków do przestrzeni jednowymiarowej właściwości ośrodka można przedstawić w formie modelu mechanicznego, którego elementami są sprężyna (cechy sprężyste), tłumik hydrauliczny (cechy lepkie) i suwak (cechy plastyczne). Z tych elementarnych modeli mechanicznych powstawały modele złożone równoległe (umownie oznaczone znakiem „||”) lub szeregowo („+”). Połączenie równoległe sumuje występujące w poszczególnych elementach naprężenia, natomiast wartości odkształceń elementów są takie same. W połączeniu szeregowym sumują się odkształcenia a wartości naprężeń są takie same. Elementarnymi modelami są materiały Hooke’a (H), Newtona (N) i Saint-Venanta (SV). W tabeli 5.1 zestawiono podstawowe informacje dotyczące powyższych modeli.

Tabela 5.1. Elementarne modele mechaniczne

Nazwa modelu	Wzór strukturalny	Schemat modelu mechanicznego	Równanie konstytutywne
Sprężysty Hooke’a	H		$\sigma = E_H \varepsilon$
Doskonale plastyczny Saint-Venanta	SV		$\sigma = \sigma_0 = const$
Lepki Newtona	N		$\sigma = \lambda_N \dot{\varepsilon}$

Model Hooke'a odwzorowuje liniową **sprężystość**, czyli właściwość, która charakteryzuje się liniową zależnością pomiędzy składowymi tensora naprężenia i tensora odkształcenia. Odkształca się natychmiast po przyłożeniu obciążenia i wraca do pierwotnej postaci po zdjęciu obciążenia.

Model Saint-Venanta opisuje doskonałą **plastyczność** – właściwość materiału objawiająca się powstawaniem trwałych odkształceń, nie znikających po zdjęciu obciążenia, przy czym poniżej pewnej wartości naprężenia (zwanej granicą plastyczności) materiał nie odkształca się a powyżej niej powstaje trwałe odkształcenie, które rośnie dopóki wartość naprężenia przewyższa granicę plastyczności.

Model Newtona jest zwany także cieczą Newtona, ponieważ – w przeciwieństwie do dwóch powyższych modeli – opisuje cechę charakterystyczną dla cieczy, czyli **lepkość**. W modelu Newtona prędkość odkształcenia jest liniową funkcją naprężenia. Model ten uwzględnia zjawisko relaksacji naprężeń w materiale.

Właściwości skał – sprężystość, plastyczność i lepkość – opisuje się także modelami mechanicznymi. Poprzez komplikację złożonego modelu mechanicznego można odwzorować też inne właściwości, takie jak relaksacja w materiale Maxwella ( $M=H+N$ ) czy opóźnienie sprężyste w materiale Kelvina ( $K=H||N$ ).

Badania zjawiska pełzania soli kamiennej i jego matematycznego opisu rozpoczęto na początku XX w. Informacje na ich temat znaleźć można m.in. w pracy Ode'a [Ode 1968]. Pierwszą propozycję matematycznej formuły opisu zachowania się soli podał Griggs [Griggs 1939]. Miała ona postać równania:  $\epsilon=A+B\log(t)+Ct$ , gdzie  $A$  jest odkształceniem natychmiastowym sprężysto-plastycznym,  $B\log(t)$  reprezentuje pełzanie pierwotne a  $Ct$  pełzanie stacjonarne.

W drugiej połowie lat 20. XX w. stworzono dla soli szereg modeli matematycznych, opisywanych w wielu publikacjach [np. Mirza 1981, Fernandez 1994, Flisiak, Kłeczek 1994, Cristescu, Hunsche 1998, Ślizowski 2006 i in.]. Na szczególną uwagę zasługują: model Lubby2 [Lux, Heusermann 1983, Lux i in. 2001] rozwijany w Technische Universität Clausthal, model WIPP [Matalucci, Hunter 1981], a także bardzo rozbudowany model MDCF (Multimechanism Deformation Coupled Fracture) [Munson, Dawson 1984] uwzględniający mechanizmy dyslokacji, deformacji i mikrospękań. Występujące w tych – i wielu innych – prawach parametry są na ogół utożsamiane z własnościami fizycznymi skały, a ich wartości liczbowe są określane na drodze różnych obserwacji empirycznych. Mają one istotne walory poznawcze, ale ich zastosowanie do praktycznych obliczeń z wykorzystaniem metod numerycznych jest na ogół niemożliwe z powodu skomplikowanej formuły matematycznej i

trudności w określaniu wartości parametrów. Z tego powodu często odchodzi się od uwzględniania całego spektrum właściwości górotworu na rzecz prostszych formuł matematycznych, pozwalających jednak dość dobrze odwzorować rzeczywistość.

Formułą spełniającą powyższy warunek jest stosowany przez wielu badaczy zachowania górotworu solnego układ szeregowo połączonego modelu Hooke'a z modelem ośrodka z potęgowym **prawem pełzania Nortona**, uwzględniającym wpływ temperatury i wzmocnienie materiału przez czas. Uzasadnieniem przyjmowania dla soli powyższego prawa są wyniki przeprowadzanych w laboratoriach badań próbek soli.

Poste prawo pełzania, używane do opisu właściwości lepkich soli, jak wiele innych, powstało w trakcie badań nad zachowaniem się metali. Zależność prędkości odkształcenia od naprężenia w  $n$ -tej potęgze podał Hoff w latach pięćdziesiątych ub. wieku [Hoff 1954, 1956]:

$$\varepsilon = \left( \frac{\sigma}{\sigma_c} \right)^n. \quad (5.2)$$

gdzie  $n$  i  $\sigma_c$  są stałymi. Alternatywne równanie podał Norton [Norton 1929] i można je przedstawić w formie:

$$\varepsilon = f(\sigma) = D\sigma^n. \quad (5.3)$$

Zmienną w czasie prędkość odkształceń otrzymano wprowadzając prawo Bailey'a [Bailey 1929]:

$$D = f(t) = Bt^m \quad (5.4)$$

a uzależnienie prędkości odkształcenia od temperatury  $T$  uzyskano stosując równanie Arrheniusa, skąd stałą  $B$  można zapisać wzorem:

$$B = f(T) = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \quad (5.5)$$

gdzie:  $Q$  jest energią aktywacji a  $R$  stałą gazową. Wprowadzając powyższe funkcje otrzymano prawo Nortona w postaci:

$$\varepsilon = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \sigma^n t^m. \quad (5.6)$$

W literaturze niemieckiej równanie łączące prędkość odkształcenia z iloczynem prawa Arrheniusa i potęgowej funkcji naprężeń pierwotnych nazwane zostało prawem BGRa (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) [Hunsche 1993]. To samo prawo w literaturze amerykańskiej występuje pod nazwą prawa Nortona-Hoffa, a w polskiej Nortona.

Warto zauważyć, że w warunkach izotermicznych dla materiału o współczynnikach  $m = 1$  i  $n = 1$ , prawo Nortona można zapisać w formie:

$$\dot{\epsilon} = B \sigma \quad \text{lub} \quad \sigma = \frac{1}{B} \dot{\epsilon}, \quad (5.7)$$

która sprowadza się do prawa konstytutywnego opisującego materiał Newtona. W tym przypadku współczynnik  $B$  jest odwrotnością lepkości dynamicznej (patrz tab. 5.1).

### **5.3. Modelowanie zachowania się górotworu pod wpływem działalności górniczej**

Określone analizą wyników badań laboratoryjnych własności fizyczne próbek soli (model fizyczny), sformułowane na tej podstawie prawo konstytutywne wraz równaniami równowagi i równaniami geometrycznymi (model matematyczny) oraz uzyskane w laboratorium wartości parametrów tego prawa (stałe materiałowe) są podstawą budowy modelu zachowania się górotworu pod wpływem eksploatacji górniczej.

Rozwiązania analityczne rozkładu naprężeń opracowane zostały jedynie dla najprostszych przypadków, takich jak rozkład naprężenia w górotworze o właściwościach sprężystych wokół wyrobiska chodnikowego o przekroju koła [Sałustowicz 1965] lub prostokąta [Sawin, Morgajewski 1935]. Związki przemieszczeń z naprężeniami dla kołowego przekroju wyrobiska w ośrodku sprężysto-plastycznym opisującym górotwór solny podał Dziunikowski [Dziunikowski 1966]. Jednak pełny opis fizyczny górotworu z wydrążonymi w nim wyrobiskami, którego właściwości zależą od wielu różnorodnych czynników, jest na tyle skomplikowany, że rozwiązanie konkretnych zagadnień metodami analitycznymi jest praktycznie niemożliwe. Autorzy ekspertyz czy publikacji posiłkują się więc metodami przybliżonymi (numerycznymi), uzyskując wystarczająco dobre rezultaty.

Modelowanie zachowania się górotworu z wykorzystaniem specjalistycznych programów komputerowych przeprowadzano dla badań nad utrzymaniem wyrobisk chodnikowych [Tajduś A. 1990], reakcjami obudowy wokół wyrobisk chodnikowych [Majcherczyk i in. 2006], określaniem stref uplastycznienia wokół wyrobisk [Walaszczyk 1989] czy zniszczenia [Tajduś A. 1990]. Podobnie określany jest stan wyężenia górotworu wokół podziemnych zbiorników sprężonego powietrza [Flisiak i in. 1997], węglowodorów płynnych [Kortas, Maj 2005], czy pojedynczej komory solnej [Ślizowski, Urbańczyk 2004],

stan naprężenia wokół komór zbiornikowych [Flisiak D., Kłeczek 1994]. Również w oparciu o symulacje zachowania się górotworu oceniano wpływ podsadzki na sąsiedztwo wyrobiska korytarzowego [Mazurkiewicz i in. 1997], stan deformacji póltek międzykomorowych w filarowo-komorowym systemie eksploatacji [Walaszczyk i in. 1998] i oddziaływanie odkrywkowej eksploatacji węgla na wysad solny [Cała i in. 2004a, 2004b] a także prowadzono badania nad ruchem górotworu solnego [Kortas i in. 2004, 2008].

Najczęściej wykonywane są modele dwuwymiarowe, wykorzystujące albo płaski stan odkształcenia (wyrobiska chodnikowe) albo symetrię osiową (komory cylindryczne). Rzadko wykonywane są modelowania sytuacji przestrzennej, wymagające uproszczeń geometrycznych [Kortas i in. 2008] lub ograniczenia modelowanej przestrzeni [Cieślik, Pietruszka 2008, Cieślik i in. 2008].

Modele numeryczne zachowania się górotworu, do których wprowadza się dane z badań laboratoryjnych, konfrontowane są z wynikami pomiarów, na przykład geodezyjnych [Flisiak i in. 1997, Kortas i in. 2004, Majcherczyk i in. 2006]. W tzw. „metodzie odwrotnej” określanie parametrów prawa materiałowego uzyskuje się na drodze takiego doboru wartości parametrów modelu, aby uzyskany wynik obliczeń był zgodny z rezultatami pomiarów [np. Tajduś A. 1990, Tajduś K. 2007, 2008, Maj 2007a, b]. Obecnie do obliczeń wykorzystywane są specjalistyczne programy komputerowe.

## 5.4. Podsumowanie i wnioski

W rozdziale 5 przedstawiono aktualny stan wiedzy obejmujący opis właściwości górotworu na podstawie testów laboratoryjnych i badań *in-situ*, przegląd prostych modeli geomechanicznych, opis prawa pełzania Nortona i przykłady zastosowań teorii fizycznych do modelowania zachowania się górotworu naruszonego eksploatacją górnictwem.

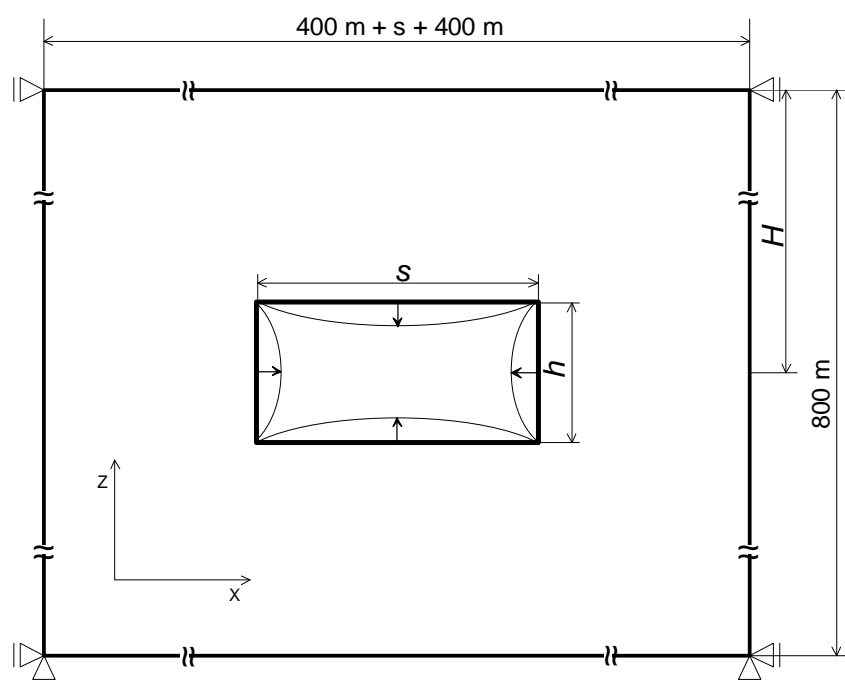
Wynika z niego, że bardzo złożone modele geomechaniczne górotworu solnego rzadko mają zastosowanie w rozwiązywaniu konkretnych zagadnień górnictwem. W praktyce lepiej sprawdzają się modele prostsze. Powszechnie w górnictwie solnym stosowany jest model sprężysto-lepki z potęgowym prawem pełzania Nortona. Model ten stanowił także podstawę do bardziej złożonych praw konstytutywnych w związku z podziemnym składowaniem odpadów i magazynowaniem paliw w złożach soli.

## 6. Model konwergencji wyrobiska chodnikowego w górotworze solnym

Doświadczenia wynikające z analizy publikacji dotyczących modelowania numerycznego skłaniają do stosowania ośrodka sprężysto-lepkiego w odwzorowaniach górotworu solnego z możliwie prostą formułą opisującą zachowania lepkie. W tym rozdziale przedstawiono model geometryczny konwergencji, zastosowane prawo konstytutywne i przyjmowane w obliczeniach wartości parametrów modelu konwergencji. Omówiono także sposób przetwarzania wyników obliczeń, w celu uzyskania wartości konwergencji.

### 6.1. Opis modelu

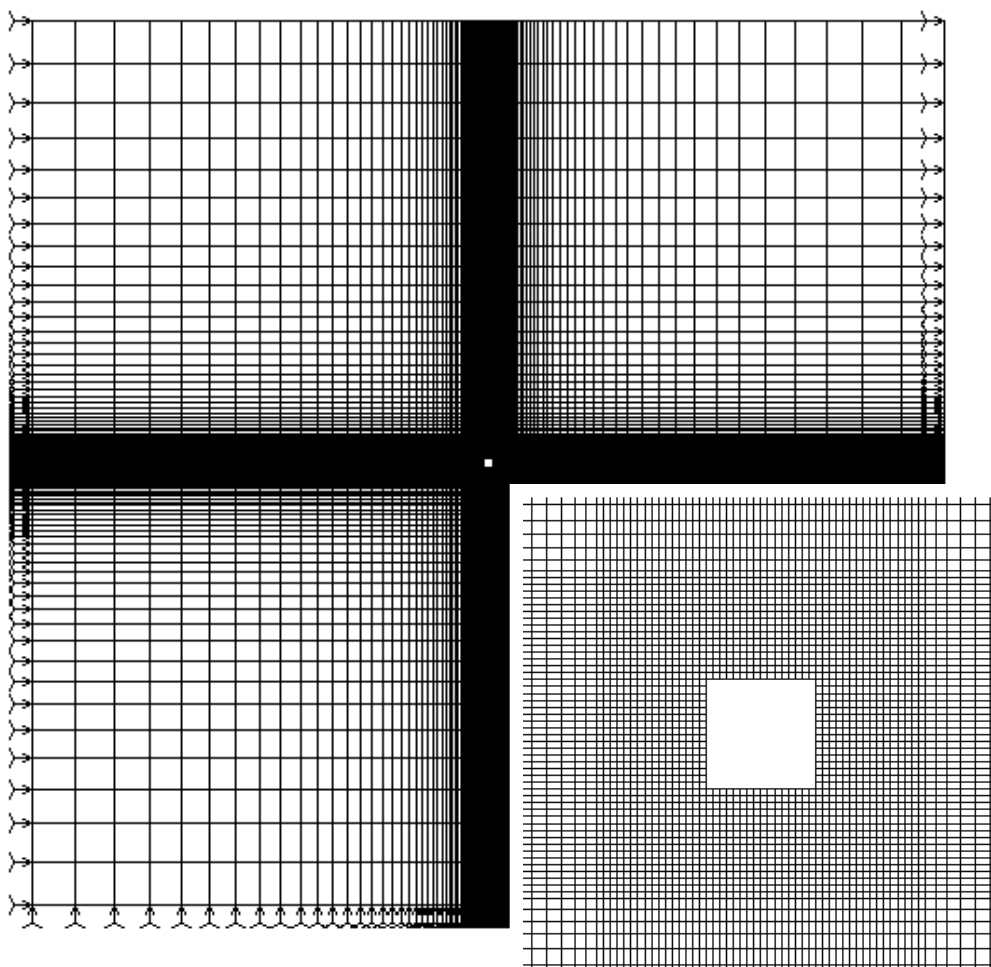
Model geometryczny górotworu z prostokątnym wyrobiskiem o bokach  $s$ ,  $h$  stanowi tarcza o wymiarach  $(800\text{ m} + s) \times 800\text{ m}$  (rys. 6.1) znajdująca się w płaskim stanie odkształcenia.



Rys. 6.1. Model geometryczny badanego zagadnienia

Tarcza została podzielona na elementy prostokątne czterowęzłowe. W obrębie konturu wyrobiska i w jego bliskim otoczeniu węzły rozmieszczane były równomiernie. Wraz ze

zbliżaniem się do brzegów tarczy zmniejszono gęstość siatki (rys. 6.2). Liczba stopni swobody modelu wyniosła 32766.



Rys. 6.2. Model dyskretny górotworu z chodnikiem kwadratowym i jego fragment

Przyjęto następujące warunki brzegowe i początkowe:

Warunki brzegowe:

- $u = 0$  dla każdego węzła  $N_i$  o współrzędnych  $(x_{min}, z)$  i  $(x_{max}, z)$
- $w = 0$  dla każdego węzła  $N_i$  o współrzędnych  $(x, z_{min})$

Górna krawędź tarczy, odpowiadająca powierzchni terenu, była nieobciążona i mogła się dowolnie przemieszczać.

Warunki początkowe:

- dla  $t = 0$ 
  - $\sigma_{33} = -\rho g H$
  - $\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_{33} \nu / (1 - \nu)$
- dla  $t = t_{lito}$

- $\sigma_{33} = -\rho g H$
- $\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_{33}$

Przyjęty model matematyczny można zapisać równaniami równowagi wewnętrznej, równaniami geometrycznymi i równaniami konstytutywnymi.

Równania równowagi wewnętrznej (Naviera):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} + X &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} + Y &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + Z &= 0 \end{aligned} \quad (6.1)$$

Równania geometryczne (Cauchy'ego):

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x} & \varepsilon_{xy} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial v}{\partial y} & \varepsilon_{yz} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial w}{\partial z} & \varepsilon_{zx} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (6.2)$$

Równania konstytutywne:

Zastosowano superpozycję odkształceń sprężystych według prawa Hooke'a (H) i lepkich zgodnie z prawem Nortona (No). Układ spełnia warunek równowagi  $\sigma = {}^H\sigma = {}^{No}\sigma$ . Z warunku przemieszczeń otrzymuje się:

$$\varepsilon_{ij} = {}^H\varepsilon_{ij} + {}^{No}\varepsilon_{ij}; \quad (6.3)$$

gdzie:

$\varepsilon_{ij}$  – tensor odkształcenia w układzie szeregowym modeli

${}^H\varepsilon_{ij}$  – tensor odkształcenia w modelu Hooke'a

${}^{No}\varepsilon_{ij}$  – tensor odkształcenia w modelu Nortona

Równanie stanu dla modelu Hooke'a można przedstawić w formie równań, z których pierwsze opisuje zasadę zmiany postaci a drugie zasadę zmiany objętości (objaśnienia symboli poniżej):

$${}^D\varepsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E} {}^D\sigma_{ij}; \quad {}^A\varepsilon_m = \frac{1-2\nu}{E} {}^A\sigma_m \quad (6.4)$$

a dla modelu Nortona w formie:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{3}{2} m A e^{\left(\frac{-Q}{RT}\right)} \sigma_e^{n-1} {}^D \sigma_{ij} t^{m-1}, \quad (6.5)$$

przy czym założyć trzeba, że rozpatrywany ośrodek jest izotropowy i odkształca się objętościowo zgodnie z prawem Hooke'a. Przy nieznaczej zmienności temperatury w rozważanym fragmencie górotworu otaczającego wyrobisko przyjąć można stałą temperaturę górotworu i zastąpić funkcję temperatury  $f(T)=A \exp(-Q/RT)$  stałą materiałową  $B$ .

Objaśnienia do wzorów:

${}^D \sigma_{ij}$  – dewiator naprężenia:  ${}^D \sigma_{ij} = \sigma_{ij} - {}^A \sigma_m \delta_{ij}$ ,  ${}^D \varepsilon_{ij}$  – dewiator odkształcenia:  ${}^D \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij} - {}^A \varepsilon_m \delta_{ij}$ ,

${}^A \sigma_m$  – naprężenie średnie:  ${}^A \sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})$ ,  ${}^A \varepsilon_m$  – odkształcenie średnie:  ${}^A \varepsilon_m = \frac{1}{3}(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33})$ ,

$\delta_{ij}$  – symbol Kroneckera,

$E, \nu$  – stałe materiałowe modelu Hooke'a: moduł Younga i liczba Poissona,

$A, B, n, m$  – stałe materiałowe modelu opisującego pełzanie ( $0 < m \leq 1$ ),

$t$  – czas,  $Q$  – energia aktywacji dla procesu pełzania,  $R$  – stała gazowa,  $T$  – temperatura,

$\sigma_e$  – naprężenie efektywne:  $\sigma_e = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)}$ ,

$\varepsilon_e$  – odkształcenie efektywne:  $\varepsilon_e = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})^2 + (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11})^2 + \frac{3}{2}(\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{23}^2 + \varepsilon_{31}^2)}$ .

Proces obliczeniowy polegał na przeprowadzeniu obliczeń numerycznych metodą elementów skończonych w szeregu krokach obliczeniowych odpowiadających przyrostom czasu. Najpierw przeprowadzano wstępne symulacje procesu pełzania tarczy bez wyrobiska pod własnym obciążeniem przez okres co najmniej 1000 lat, w celu uzyskania hydrostatycznego stanu naprężeń pierwotnych  $p_1=p_2=p_3$ , charakterystycznego dla górotworu solnego. Wybieranie złoża odwzorowano przez jednoczesne usunięcie wszystkich elementów w obrębie konturu wyrobiska, po czym kontynuowano proces w kilku etapach, odpowiadających okresowi zaciskania wyrobiska równemu 1 rok, 2 lata, 5, 10, 20, 50 i 100 lat. Kroki obliczeniowe dobierano osobno dla okresu przed usunięciem elementów i dla każdego następnego etapu. W wyniku obliczeń programem Cosmos/M z modułem *nonlinear* otrzymywano pliki tekstowe zawierające dane o przemieszczeniach, odkształceniach i naprężeniach dla wszystkich węzłów w krokach obliczeniowych odpowiadających poszczególnym etapom obliczeń.

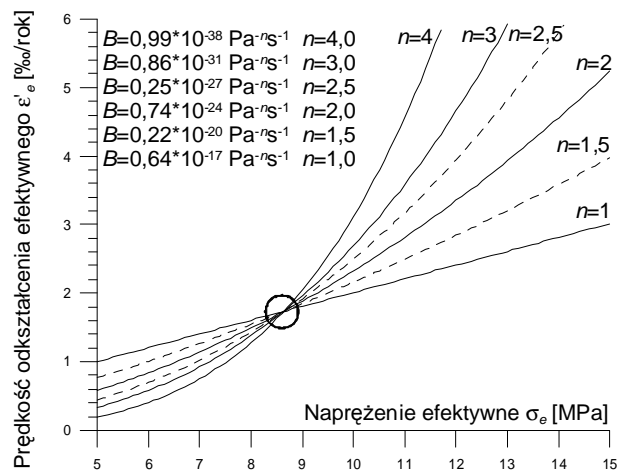
## 6.2. Zakres wartości parametrów modelu

Wartości parametrów prawa konstytutywnego uzyskuje się na drodze testów laboratoryjnych (patrz rozdz. 5.1), badań *in-situ* i analizy odwrotnej. W tej pracy posłużono się danymi z przeglądu literatury. W prawie pełzania (6.5) wartości  $n$  zawarte są w zakresie od 1,5 do 6,0 a wartości  $m$  najczęściej w przedziale od 1,00 do 0,33, choć niektórzy autorzy podają wartości mniejsze nawet  $m=0,18$  [Sobczyk, Kortas 2003, Colin, You 1990]. W laboratoryjnych testach pełzania otrzymuje się podobne wartości  $m$ , a  $n$  nawet poniżej 2,0 [Badania... 2005]. Zwykle nie rozważa się zmiennej w czasie prędkości pełzania, czyli przyjmuje się  $m=1$ . Zakres wartości parametrów geometrycznych (wymiary chodnika, smukłość) dobrano tak, aby obejmował wyrobiska chodnikowe o małych wymiarach (np. poprzeczniki w Bochni) oraz duże chodniki wentylacyjne i transportowe (np. Sierszowice, Kłodawa). W obliczeniach stosowano następujący zakres wartości parametrów:

- parametry prawa Hooke'a:
  - moduł Younga  $E$  [GPa]  $\in \{0,5; 1,5; 5,0; 15,0; 50,0\}$
  - współczynnik Poissona  $\nu$  [-]  $\in \{0,2; 0,3; 0,4\}$
  - moduł ścisłości objętościowej – Helmholtza:  $0,278 \leq K$  [GPa]  $\leq 83,333$ ; zakres wynika ze wzoru  $K = E/[3(1-2\nu)]$
- parametry prawa Nortona:
  - wykładnik naprężenia efektywnego  $n$  [-]  $\in \{1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5\}$
  - wykładnik czasu  $m$  [-]  $\in \{0,3; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0\}$
  - współczynnik  $B$  [ $\text{Pa}^{-n}\text{s}^{-m}$ ] dobierany był do wartości  $n$  i  $m$  (opis poniżej)
- parametry geometryczne:
  - wysokość przekroju poprzecznego chodnika  $h$  [m]  $\in \{2, 4, 8\}$
  - szerokość przekroju poprzecznego chodnika  $s$  [m]  $\in \{2, 4, 8\}$
  - smukłość przekroju poprzecznego chodnika  $\lambda$  [-]  $\in \{0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0\}$  wynika z proporcji wysokości do szerokości przekroju chodnika
  - głębokość, na jakiej położone jest wyrobisko  $H$  [m]  $\in \{200, 300, 400, 500, 600\}$

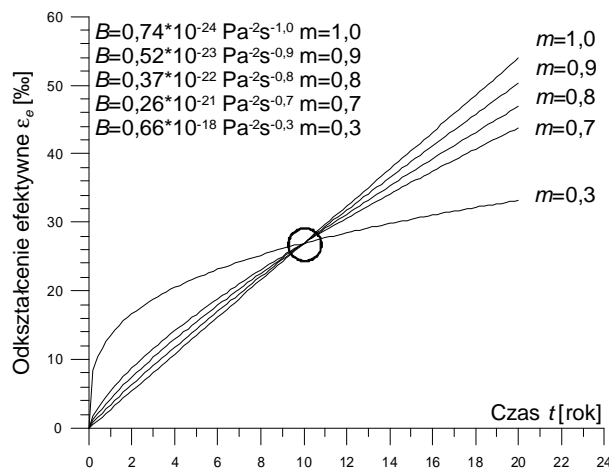
Kombinacja powyższych parametrów daje łączną liczbę około 500 wykonanych zadań. W zależności od wartości parametrów prawa pełzania przyjmowano zróżnicowany czas  $t_{ito}$  [rok] potrzebny do wytworzenia hydrostatycznego stanu naprężenia pierwotnego. Konwergencja była obliczana dla 8 okresów od powstania chodnika:  $t_i$  [rok]  $\in \{0, 1, 2, 3, 5, 20, 50, 100\}$ .

Wyznaczenie wartości parametru  $B$  zależy od wartości parametrów  $n$  i  $m$ . Z tego względu, podobnie, jak inni autorzy [np. Ślizowski 2006], przyjęto kryteria przyporządkowywania  $n$  i  $B$  oraz  $m$  i  $B$ . Kryterium dla  $n$  i  $B$  polegało na takim ich doborze, aby przy naprężeniu efektywnym  $\sigma_e = 8,6328$  MPa otrzymywać jednakowe wartości prędkości odkształcenia efektywnego  $d\varepsilon_e/dt = 1,73$  ‰/rok, bo na głębokości położenia środka modelu naprężenia pierwotne – na 400 m – naprężenia pierwotne wynoszą  $-8,6328$  MPa. Ilustracją kryterium jest rys. 6.3.



Rys. 6.3. Określanie wartości par  $B$ ,  $n$  prawa Nortona

W kryterium doboru parametrów  $B$  i  $m$  należy dodatkowo uwzględnić czas. Założono, że dla czasu  $t = 10$  lat i wszystkich par  $B$  i  $m$  odkształcenia efektywne w prawie konstytutywnym będą równe 17,34 ‰ przy naprężeniu efektywnym równym 8,6328 MPa. Ilustruje to rys. 6.4.



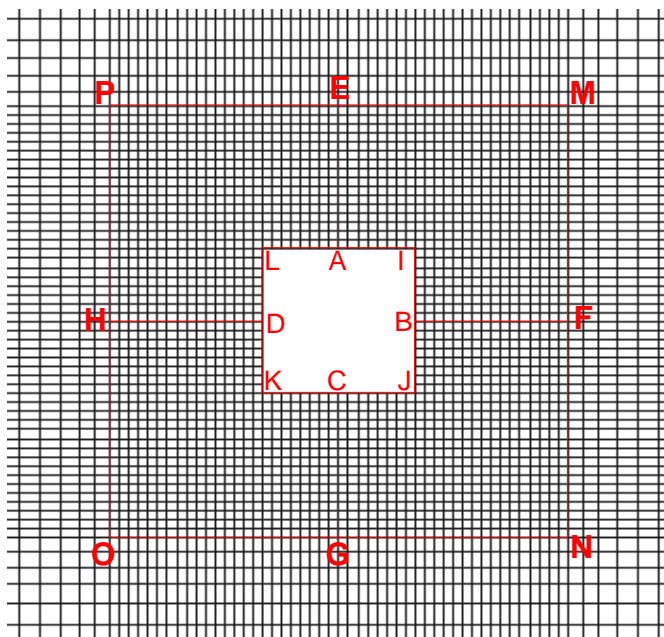
Rys. 6.4. Dobór  $B$  do wartości wykładnika czasu  $m$  dla  $\sigma_e = 10$  MPa

### 6.3. Sposób opracowania wyników symulacji numerycznych

Jak napisano w rozdz. 5.3 w wyniku przeprowadzonych symulacji komputerowych dla każdego zadania powstały zbiory tekstowe z danymi o naprężeniach, odkształceniach i przemieszczeniach w każdym węźle i dla zadanych przedziałów czasu. W celu wyliczenia konwergencji skorzystano ze specjalnie przygotowanego programu, dzięki któremu na podstawie danych wyjściowych pakietu Cosmos/M:

- wyznaczono numery węzłów w obrębie rozważanego obszaru górotworu (prostokąt MNOP na rys. 6.5);
- stworzono tablice przemieszczeń, odkształceń i naprężeń;
- na podstawie danych o przemieszczeniach obliczono pionową konwergencję liniową  $k_h(t_i) = \Delta w_h(t_i) = w_A(t_i) - w_C(t_i)$  pomiędzy punktami A i C oraz poziomą  $k_s(t_i) = \Delta w_s(t_i) = u_B(t_i) - u_D(t_i)$  pomiędzy punktami B i D dla zadanych okresów  $t_i$ ;
- na podstawie danych o przemieszczeniach wszystkich węzłów na konturze wyrobiska (prostokąt IJKL) obliczono konwergencję powierzchniową  $k_p(t_i)$  dla zadanych okresów  $t_i$ ; znając wartość przemieszczeń w węzłach i położenie węzłów konwergencję powierzchniową obliczano metodą sumowania powierzchni trapezów;
- na podstawie danych o konwergencjach liniowych i powierzchniowych obliczono ich względne wartości  $\xi_h(t_i) = k_h(t_i) / h$ ,  $\xi_s(t_i) = k_s(t_i) / s$ ,  $\xi_p(t_i) = k_p(t_i) / p$  dla zadanych okresów  $t_i$  ( $h$  jest odległością między punktami A i C,  $s$  jest odległością między punktami B i D,  $p$  jest polem powierzchni prostokąta IJKL);
- pomiędzy 10. a 20. rokiem zaciskania wyrobiska ( $\Delta t_{10}$ ) obliczono pozostałe wielkości charakteryzujące zaciskanie wyrobiska: prędkości konwergencji  $k'_h = \Delta k_h / \Delta t_{10}$ ,  $k'_s$  i  $k'_p$  oraz prędkości względnych konwergencji  $\xi'_h = \Delta \xi_h / \Delta t_{10}$ ,  $\xi'_s$  i  $\xi'_p$  a także stosunek prędkości względnych konwergencji liniowych  $\xi'_h / \xi'_s$ .

Powyższe wielkości opatrzone indeksami  $e$  lub  $v$  w zależności od tego, czy konwergencja związana jest z odkształceniami natychmiastowymi ( $e$ ) czy odkształceniami w fazie pełzania ( $v$ ). Poza konwergencją obliczono również rozkłady niezmienników Burzyńskiego  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\Omega_1$  i  $\Omega_2$  w obrębie prostokąta MNOP.



Rys. 6.5. Fragment siatki węzłów obejmujący rozważany obszar górotworu

## 6.4. Podsumowanie

W rozdziale 6 sformułowano model konwergencji w oparciu o potęgowe prawo pełzania Nortona. Przedstawiono przyjęty model obliczeniowy z przemieszczeniowymi warunkami brzegowymi i warunkami początkowymi odpowiadającymi  $p_1 = p_2 = p_3$ , zakres przyjętych wartości parametrów fizycznych, geometrycznych i czasowych oraz metodykę prowadzenia obliczeń i opracowania wyników przeprowadzonych symulacji zaciskania wyrobiska. Sformułowany w tym rozdziale model konwergencji służył przeprowadzenia obliczeń kilkuset zadań dla określenia konwergencji i jej związków ze zmiennymi w modelu parametrami geometrycznymi i fizycznymi.

## 7. Zastosowanie modelu konwergencji

Model konwergencji przedstawiony w poprzednim rozdziale wymaga najpierw rozpoznania i porównania z obserwowanym zjawiskiem. Rozpoznanie modelu pozwala ujawnić zależności konwergencji od zmiennych modelu, co najwygodniej jest przedstawić w postaci funkcji wyrażanych możliwie prostymi wzorami. W złożonym modelu zjawiska przeprowadza się obliczenia dla wielu serii zadań, przy czym w każdej serii poszczególne zadania różnią się wartościami jednej zmiennej. Z poszukiwanych własności w rozdziale 7.1 przedstawiono podstawowe zależności konwergencji, w tym od kształtu wyrobiska i jego głębokości oraz od stałych materiałowych górotworu sprężystych i lepkich.

W rozdziale 7.2 przedstawiono zastosowanie modelu do interpretacji wyników pomiaru konwergencji na przykładzie chodnika w Sieroszowicach z określeniem na tej drodze właściwości górotworu.

### 7.1. Określenie zależności charakteryzujących zjawisko zaciskania wyrobiska

#### 7.1.1. Reguła kształtu

Spośród badanych czynników wpływających na sposób zaciskania chodnika o przekroju prostokątnym najbardziej znaczącym jest jego kształt, identyfikowany tutaj jako smukłość, czyli stosunek wysokości do szerokości  $\lambda = h / s$ . Przeprowadzone analizy dla  $n=2$  wskazują, że stosunek konwergencji względnych lub ich prędkości nie jest równy stosunkowi wymiarów wyrobiska, jest natomiast funkcją potęgową smukłości i została nazwana regułą kształtu [Kortas 2004]:

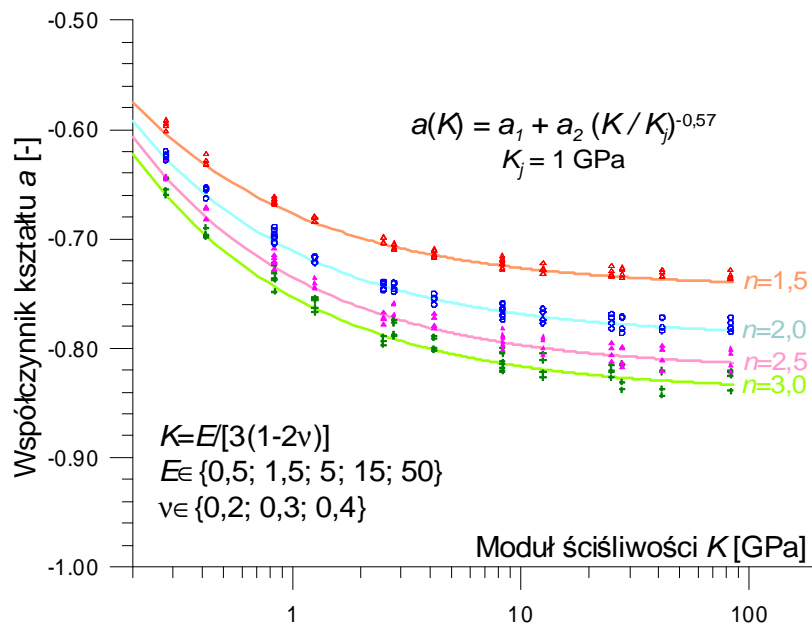
$$\left( \frac{\dot{\xi}_h}{\dot{\xi}_s} \right)^a = \frac{h}{s}, \quad -1 < a < 0. \quad (7.1)$$

Wskaźnik  $a$  wyznaczany ze wzoru (7.1) jest parametrem charakterystycznym dla danego ośrodka i zależy od wartości parametrów przyjętego w tym ośrodku prawa konstytutywnego, zależy więc od właściwości górotworu, w tym od modułu ściśliwości.

Badania modelowe objęły wyznaczenie wskaźnika  $a$  dla szeregu chodników o smukłościach 0,25; 0,5; 2 i 4. Obliczano prędkość konwergencji w 20 roku. Przyjęto następujące wartości parametrów prawa Hooke'a:

- moduł Younga  $E \in \{0,5; 1,5; 5,0; 15,0; 50,0 \text{ GPa}\}$
- współczynnik Poissona  $\nu \in \{0,2; 0,3; 0,4\}$

Dla takiego szeregu  $E$  i  $\nu$  moduł ściśliwości  $K$  będzie się zawierał w granicach od 0,28 GPa do 83,3 GPa. Współczynnik  $n$ , parametr potęgowego prawa pełzania Nortona, zmieniano w granicach  $n \in \{1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0\}$ , a parametr  $B$  dobierano wg opisanego w rozdz. 6.2 kryterium. Wykonano obliczenia dla 300 zadań. Na rys. 7.1 przedstawiono zależności wskaźnika  $a$  od modułu ściśliwości  $K$  dla 5 wartości  $n$ .



Rys. 7.1. Współczynnik  $a$  w funkcji modułu ściśliwości  $K$  dla różnych wartości  $n$

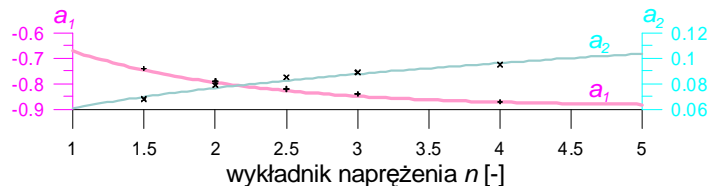
Parametr  $a$  dla badanego zestawu zadawanych  $E$  i  $\nu$  przybiera wartości od -0,86 do -0,44. Generalnie ze wzrostem modułu  $K$  jego wpływ na wartość współczynnika  $|a|$  maleje. Ze wzrostem  $n$  rośnie wartość  $|a|$ . Zależność współczynnika kształtu od modułu ściśliwości można wyrazić wzorem:

$$a = a_1 + a_2 \left(\frac{K}{K_j}\right)^{-0.57} \quad (7.2)$$

gdzie:  $a_1, a_2$  – stałe zależne od  $n$ ,  $K$  – moduł ściśliwości,  $K_j = 1$  GPa. Wartość  $a-a_1$  jest więc proporcjonalna do  $K^{-0,57}$ , czyli  $a$  zmniejsza się ze wzrostem  $K$ . Wartości  $a_1(n)$  i  $a_2(n)$  aproksymowane przez funkcje (7.3) pokazano na rys. 7.2.

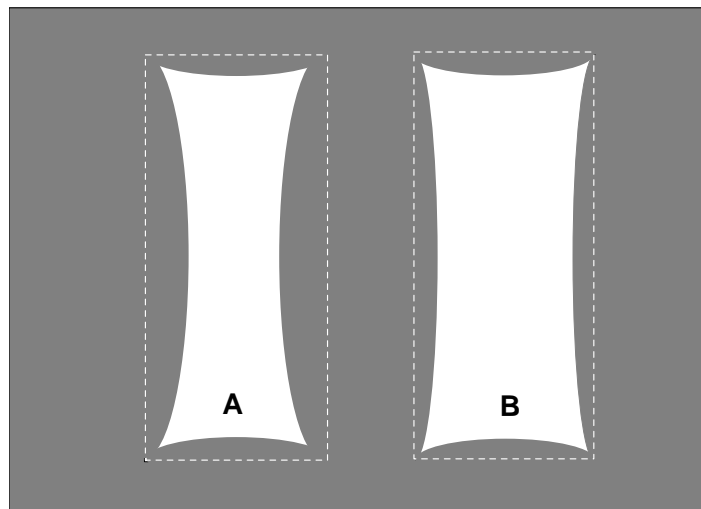
$$a_1 = -0,39 - \frac{1 - \exp(-0,83n)}{2} \quad (7.3)$$

$$a_2 = 0,137 - 0,028n \approx 0,061n^{0,33}$$



Rys. 7.2. Zależność współczynników  $a_1$  i  $a_2$  od  $n$

Rozpatrzmy konwergencję chodnika o smukłości  $\lambda > 1$  (rys.7.3). W takim wyrobisku spodziewamy się większych przemieszczeń ociosu niż stropu, czyli bezwzględna wartość konwergencji pionowej jest mniejsza niż poziomej  $|k_h| < |k_s|$ . a także dotyczy to prędkości tych konwergencji, a także konwergencji względnych, bo mniejszą konwergencję  $|k_h|$  dzielimy przez dłuższy bok, a większą  $|k_s|$  przez krótszy bok



A	$h=8$ m	$h/s=2$	$k_h=-8$ mm	$\xi_h=-1\%$	$\xi_h/\xi_s=0,25$	$a=-0,5$
	$s=4$ m		$k_s=-16$ mm	$\xi_s=-4\%$		
B	$h=8$ m	$h/s=2$	$k_h=-8$ mm	$\xi_h=-1\%$	$\xi_h/\xi_s=0,50$	$a=-1,0$
	$s=4$ m		$k_s=-8$ mm	$\xi_s=-2\%$		

Rys. 7.3. Ilustracja do reguły kształtu

Niech  $h/s=2$ . Dla  $a=-0,5$  – zgodnie z regułą kształtu – stosunek prędkości względnych konwergencji pionowej do poziomej jest  $1/4$ , natomiast dla  $a=-1$  jest  $1/2$ . Zatem im  $|a|$  będzie mniejsze, tym większa w zaciskaniu będzie dominacja ruchu konwergencyjnego ociosów. Podobnie będzie dla chodnika o smukłości  $1/2$ , czyli takiego, gdy jego wysokość będzie dwukrotnie mniejsza niż szerokość. Wtedy przy małych wartościach  $|a|$  w zaciskaniu bardziej dominuje ruch stropowy i spągowy niż dla większych wartości  $|a|$ . Wzory wskazują, że dominacja ta zmniejsza się ze wzrostem modułu ściśliwości górotworu i wzrostem wartości  $n$ .

### 7.1.2. Wpływ smukłości na konwergencję natychmiastową i w trakcie pełzania\*

W pracy Kortasa [2007] przedstawiającej wyniki badań wielopoziomowych struktur zauważono, że konwergencja powierzchniowa kopalni ( $\xi_K$ ) jest funkcją kwadratową logarytmu smukłości wielopoziomowej struktury kopalni ( $\lambda_S$ ). Cechą charakterystyczną tej relacji było to, że  $\xi_K(\lambda_S) = \xi_K(\lambda_S^{-1})$ .

Wstępna analiza wyników badań konwergencji wskazywała na podobną relację w odniesieniu do pojedynczych wyrobisk o odwrotnych smukłościach takich, że dla  $\lambda = h/s$  i  $\lambda' = h'/s'$  zachodzi:  $\lambda \lambda' = 1$ . Badanie wpływu smukłości prostokątnego przekroju chodnika na natychmiastową konwergencję przeprowadzono dla  $\lambda = 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0$ . Rozpatrywano kilka wartości parametrów mechanicznych ośrodka: modułu Younga  $E = 0,5$  GPa; 1,5 GPa; 5,0 GPa; 15,0 GPa i 50,0 GPa oraz współczynnika Poissona  $\nu = 0,2; 0,3$  i  $0,4$ . Wynik obliczeń prezentuje się jako funkcję smukłości przekroju chodnika (rys. 7.4).

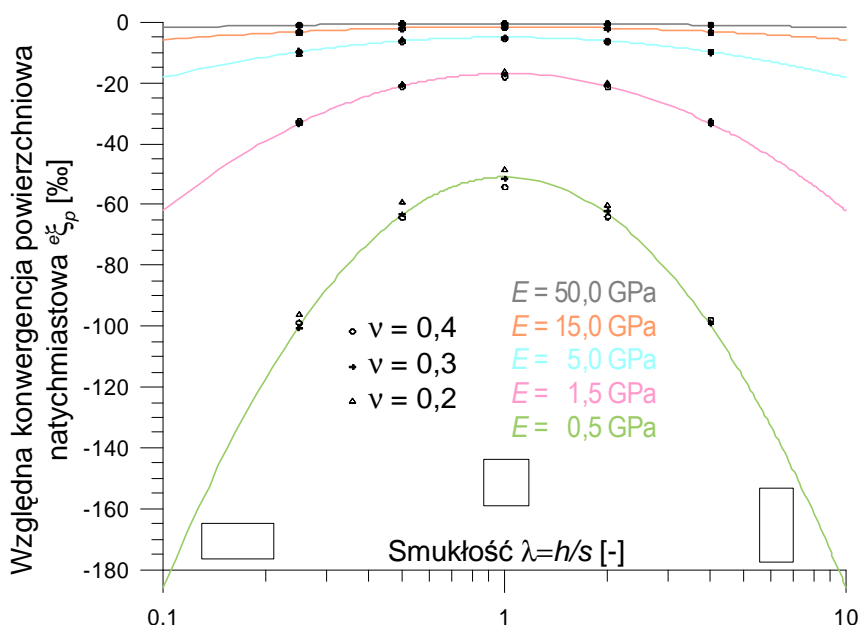
Na wykresie (rys. 7.4) każdej smukłości odpowiada pięć punktów dla pięciu wartości  $E$ . Wpływ na konwergencję współczynnika Poissona w zakresie od 0,2 do 0,4 był nieznaczny. Maksymalna różnica konwergencji powierzchniowej dla skrajnych wartości  $\nu$  wystąpiła przy  $\lambda = 1$  i  $E = 0,5$  GPa i wyniosła 5%, dlatego dalsze rozważania ograniczono tu do badania związków  $E$  i  $\lambda$  z konwergencją. Najmniejsze wartości konwergencji otrzymano dla chodników o przekroju kwadratowym  $\lambda = 1$ . Wraz z różnicowaniem wymiarów pionowego  $h$  i poziomego  $s$  przekroju chodnika wartości konwergencji wzrastają, a konwergencje chodników o smukłości  $\lambda$  i  $1/\lambda$  są takie same. Przy zastosowaniu logarytmicznej skali  $\lambda$

---

\* Wykorzystano publikację autorki [Maj 2008a]

ujawnia się na wykresie symetria wyników obliczeń konwergencji względem pionowej osi  $\lambda = 1$ .

Wyniki symulacji pokazują wyraźny wpływ modułu Younga, im mniejsza wartość  $E$  (większa odkształcalność) tym większe wartości konwergencji i większy wpływ smukłości chodnika.



Rys. 7.4. Konwergencja powierzchniowa natychmiastowa w funkcji smukłości

Wyniki obliczeń konwergencji odpowiadające poszczególnym wartościom  $E$  aproksymowano funkcjami opisującymi zależność konwergencji powierzchniowej od smukłości chodnika. Funkcje te można zapisać ogólnym wzorem:

$$e^{\xi}_p(\lambda) = c_1 + c_2 \ln^2 \lambda, \quad (7.4)$$

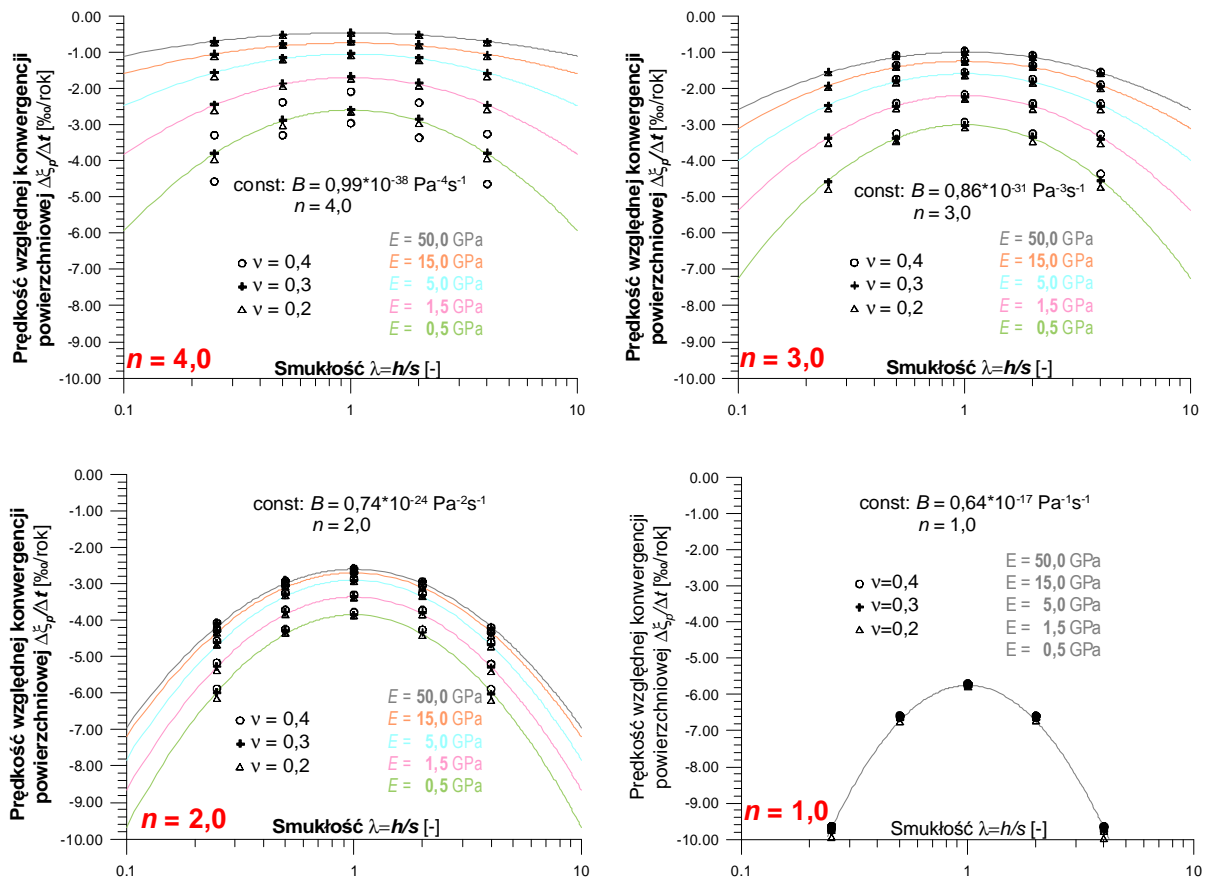
gdzie  $c_1$  i  $c_2$  są pewnymi stałymi. Między stałymi zachodzi relacja:  $c_2 = 0,50c_1$ , czyli:

$$e^{\xi}_p(\lambda) = c_1(1 + 0,50 \ln^2 \lambda). \quad (7.5)$$

Stała  $c_1$  jest równa natychmiastowej konwergencji powierzchniowej chodnika o przekroju kwadratowym  $\lambda=1$  i jest równa ekstremum funkcji aproksymującej zależność względnej konwergencji powierzchniowej od smukłości przekroju chodnika dla ośrodka o danym  $E$ .

Wielkością charakteryzującą zaciskanie w trakcie pełzania górotworu jest prędkość konwergencji. W drugiej serii zadań badano wpływ smukłości na prędkość względnej konwergencji powierzchniowej. Określano zaciskanie wyrobiska w 20. roku dla tego samego jak poprzednio zakresu wartości  $\lambda$ ,  $E$  i  $\nu$  oraz dodatkowo dla wartości powiązanych ze sobą

par parametrów  $B$  i  $n$  potęgowego prawa pełzania:  $B \in \{0,64 \cdot 10^{-17} \text{ Pa}^{-1} \text{ s}^{-1}, 0,74 \cdot 10^{-24} \text{ Pa}^{-2} \text{ s}^{-1}, 0,86 \cdot 10^{-31} \text{ Pa}^{-3} \text{ s}^{-1}, 0,99 \cdot 10^{-38} \text{ Pa}^{-4} \text{ s}^{-1}\}$ ,  $n \in \{1,0; 2,0; 3,0; 4,0\}$ . Wyniki przyrostów względnej konwergencji powierzchniowej przedstawiono na czterech wykresach (rys. 7.5), osobno dla każdej pary  $B$  i  $n$ . W analizie pominięto mniej istotny wpływ współczynnika Poissona.



Rys. 7.5. Prędkość względnej konwergencji powierzchniowej w funkcji smukłości dla różnych wartości parametrów prawa pełzania

Wykresy na rys. 7.5 mają kształt analogiczny do wykresów na rys. 7.4. Występuje także symetria względem pionowej osi  $\lambda = 1$  przy wprowadzeniu logarytmicznej skali smukłości. Podobny jak poprzednio jest też wpływ wartości modułu Younga, im mniejsze  $E$  tym prędkość konwergencji większa. Zmienność wartości konwergencji zależy od poszczególnych wartości par  $B$  i  $n$ . Wraz z obniżaniem wartości parametru  $n$  (od  $n = 4$  do  $n = 1$ ) przedział wartości prędkości konwergencji dla poszczególnych wartości  $\lambda$  zmniejsza się i przy  $n = 1$  moduł Younga nie ma znaczenia.

Funkcja aproksymacyjna wyrażająca szukany związek ma analogiczną postać jak (7.4), ale zmienną zależną jest teraz przyrost konwergencji w czasie:

$$\frac{\Delta^v \xi_p}{\Delta t} = c_3 + c_4 \ln^2 \lambda \quad (7.6)$$

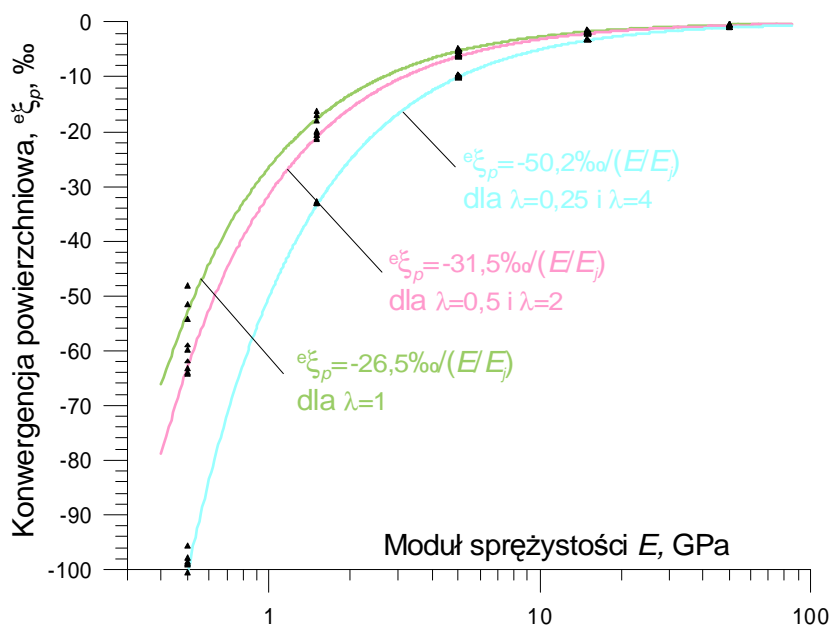
Stosunek współczynników w funkcji (7.6) zawarty jest w przedziale  $0,30 \leq c_4/c_3 \leq 0,33$ . Zastępując stosunek współczynników  $c_4/c_3$  przez pewną stałą  $c_5$  związek (7.6) można w przybliżeniu wyrazić funkcją:

$$\frac{\Delta^v \xi_p}{\Delta t} = c_3(1 + c_5 \ln^2 \lambda), \text{ gdzie } c_5 \approx 0,33. \quad (7.7)$$

Dla  $\lambda=1$  wartość stałej  $c_3$  jest prędkością konwergencji powierzchniowej chodnika o przekroju kwadratowym w fazie pełzania w ośrodku o danych wartościach  $(B, n)$ .

### 7.1.3. Wpływ modułu Younga na konwergencję natychmiastową i w trakcie pełzania\*

W poprzednim rozdziale przedstawiono zależność względnej konwergencji powierzchniowej natychmiastowej od smukłości przekroju wyrobiska. Wyniki obliczeń tych samych, co poprzednio zadań przedstawiono w tym rozdziale na wykresie zależności konwergencji od modułu Younga  $E$  (rys. 7.6).



Rys. 7.6. Zależność sprężystej konwergencji powierzchniowej od  $E$

\* Wykorzystano publikację autorki [Maj 2008a]

Wartość konwergencji powierzchniowej jest największa dla  $E = 0,5$  GPa (duża odkształcalność), a najmniejsza dla  $E = 50$  GPa (mała odkształcalność). Poszukiwano funkcji opisującej zależność względnej konwergencji powierzchniowej od modułu Younga dla poszczególnych wartości  $\lambda$ . Funkcją tą jest hiperbola zmiennej  $E$ , wykazująca zbieżność do asymptoty  ${}^e\xi_p = 0$ :

$${}^e\xi_p(\lambda, E) = \frac{{}^e\xi_p(\lambda)}{E/E_j} \quad (7.8)$$

Analiza wymiarowa wykazała konieczność wprowadzenia do wzoru wielkości  $E_j = 1$  GPa. Wprowadzając funkcję  ${}^e\xi_p(\lambda)$  zapisaną wzorem (7.4) otrzymano:

$${}^e\xi_p(\lambda, E) = \frac{c_1 + c_2 \ln^2 \lambda}{E/E_j}. \quad (7.9)$$

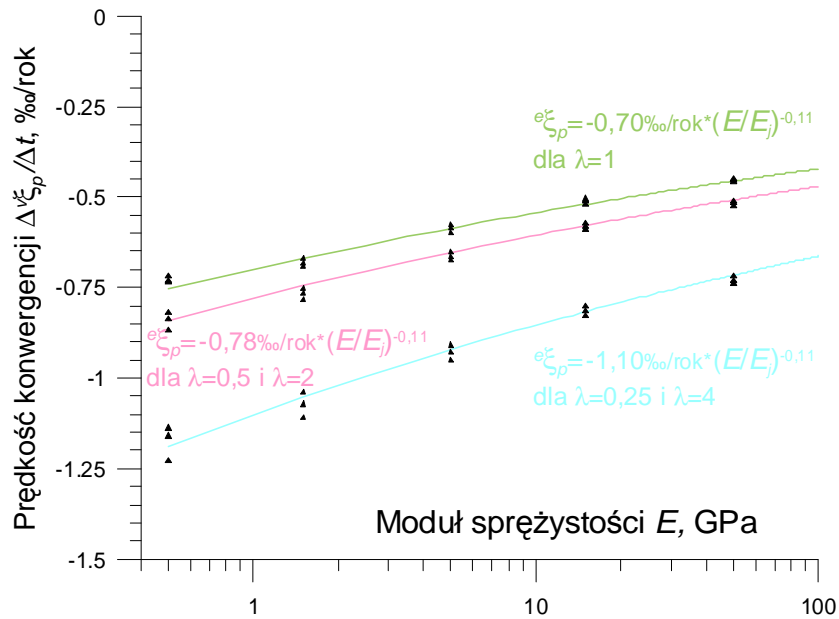
Szukając znaczenia stałych w tej funkcji przyjęto najpierw  $E = E_j$ . Okazało się, że dla  $\lambda = 1$  otrzymano  $c_1 = -12,5\%$  i jest to wartość względnej konwergencji powierzchniowej chodnika o przekroju kwadratowym w ośrodku o module Younga  $E = 1$  GPa. Natomiast, jeżeli  $\lambda = e$  (podstawa logarytmu naturalnego), to  $c_2$  równe jest różnicy konwergencji chodników o  $\lambda = 1$  i  $\lambda = e$ . Różnica ta ma wartość  $-26,5\%$ .

Prędkość zaciskania wyrobiska jest konsekwencją jego właściwości sprężystych i lepkich górotworu, dlatego parametry prawa Hooke'a wpływają także na prędkość konwergencji. W następnym badaniu poszukiwano zależności prędkości względnej konwergencji powierzchniowej w 20. roku zaciskania pustki od modułu Younga. Wyniki obliczeń przedstawione na rys. 7.7 pokazują – podobne jak rys. 7.6 – związki konwergencji z modulem Younga. Dla małych wartości modułu Younga wartości konwergencji są większe.

Przeprowadzając analogiczne do poprzedniego postępowanie, znaleziono funkcję opisującą zależność prędkości względnej konwergencji od  $E$  i  $\lambda$  w postaci:

$$\frac{\Delta^v \xi_p}{\Delta t}(\lambda, E) = \frac{-0,7\%/rok - 0,19\%/rok \ln^2(\lambda)}{(E/E_j)^{0,11}}. \quad (7.10)$$

Wartość  $-0,7$  %/rok jest prędkością względnej konwergencji powierzchniowej wyrobiska o przekroju kwadratowym w ośrodku o  $E = 1$  GPa, a  $-0,19$  %/rok jest różnicą prędkości konwergencji powierzchniowej pomiędzy wyrobiskami o przekrojach  $\lambda = e$  i  $\lambda = 1$ . Wykładnik o wartości 0,11 w mianowniku wyraźnie łagodzi wpływ wartości modułu Younga na konwergencję.



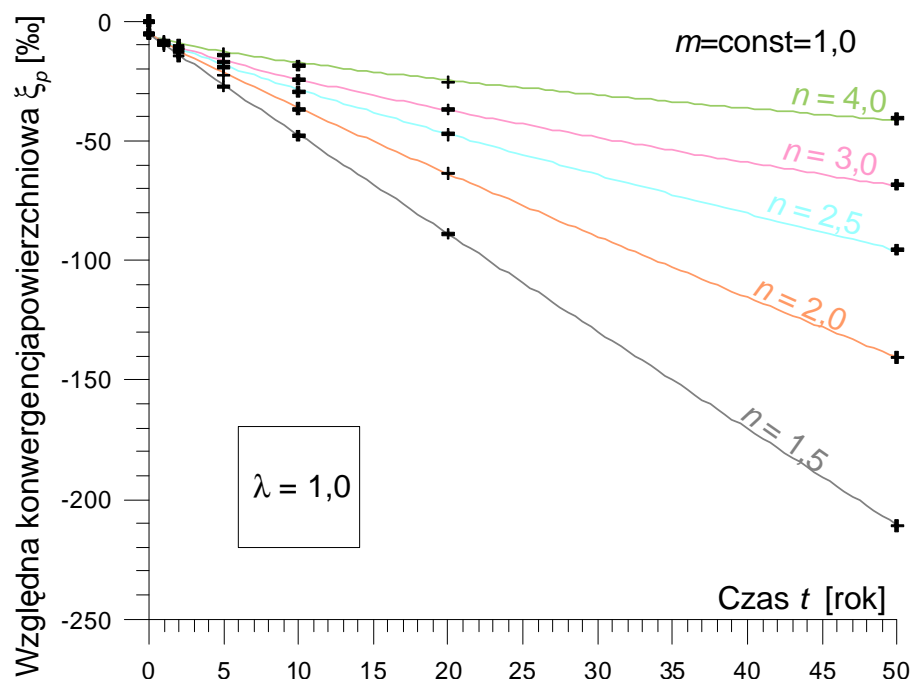
Rys. 7.7. Prędkość konwergencji powierzchniowej lepkiej w funkcji  $E$

#### 7.1.4. Wpływ czasu na konwergencję powierzchniową \*

Wpływ wykładnika przy naprężeniu  $n$  na konwergencję w funkcji czasu badany był dla chodnika o przekroju kwadratu, znajdującego się na głębokości  $H = 400$  m w ośrodku o  $E = 5,0$  GPa i  $\nu = 0,3$ . Przyjmując wartość parametru  $m = 1,00$  rozpatrywano następujące wartości parametrów  $B$  i  $n$  prawa pełzania:  $B = 0,22 * 10^{-20} \text{ Pa}^{-1,5} \text{ s}^{-1}$  i  $n = 1,5$ ;  $B = 0,74 * 10^{-24} \text{ Pa}^{-2,0} \text{ s}^{-1}$  i  $n = 2,0$ ;  $B = 0,25 * 10^{-27} \text{ Pa}^{-2,5} \text{ s}^{-1}$  i  $n = 2,5$ ;  $B = 0,86 * 10^{-31} \text{ Pa}^{-3,0} \text{ s}^{-1}$  i  $n = 3,0$ ;  $B = 0,99 * 10^{-38} \text{ Pa}^{-4,0} \text{ s}^{-1}$  i  $n = 4,0$ .

Wyniki obliczeń numerycznych konwergencji powierzchniowej kwadratowego chodnika pokazano na rys. 7.8 oznaczając je krzyżykami; linie ciągłe przedstawiają funkcje aproksymujące te wyniki.

\* Wykorzystano publikację autorki [Maj 2008b]



Rys. 7.8. Wpływ wykładnika przy naprężeniu  $n$  na konwergencję powierzchniową

Wartości konwergencji natychmiastowej  ${}^e \xi_p (t=0)$  jest jednakowa dla wszystkich rozpatrywanych parametrów  $B$  i  $n$ . Ze wzrostem czasu moduły (wartości bezwzględne) rosną. Funkcje opisujące zależność względnej konwergencji powierzchniowej od czasu  $\xi_p(t)$  można przedstawić prostym wzorem w postaci:

$$\xi_p(t) - {}^e \xi_p = c_1 \left( \frac{t}{t_j} \right)^{c_2} \quad (7.11)$$

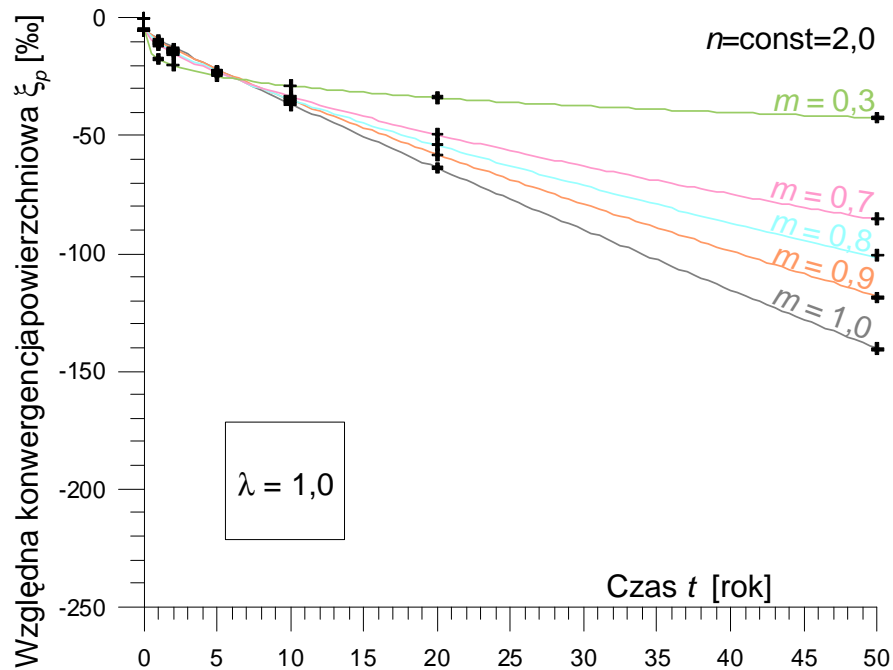
gdzie  $c_1$  i  $c_2$  są współczynnikami zależnymi od parametru  $n$ . Ich wartości zebrano w tabeli 7.1 w dalszej części rozdziału. Z analizy wymiarowej wynika konieczność wprowadzenia do wzoru (7.11) stałej  $t_j = 1$  rok. Współczynnik  $c_2 = f(n)$  dla badanego kryterium w pierwszym przybliżeniu można zapisać w postaci funkcji liniowej  $n$ :

$$c_2(n) = (1 - c)n + c, \quad \text{gdzie } c = 1,0957. \quad (7.12)$$

Takie same badania przy innym kryterium ( $d\varepsilon_e/dt = 3,65$  %/rok) wykazały taką samą postać funkcji aproksymujących wyniki obliczeń konwergencji (7.11) z innymi wartościami  $c_1$  i  $c_2$ .

Dla zbadania wpływu parametru  $m$  na konwergencję sformułowano kolejny zestaw zadań dla  $n=2,0$ . Rozpatrywano następujące wartości parametrów:  $B=0,74 \cdot 10^{-24} \text{ Pa}^{-2} \text{ s}^{-1,0}$  i  $m=1,0$ ;  $B=0,52 \cdot 10^{-23} \text{ Pa}^{-2} \text{ s}^{-0,9}$  i  $m=0,9$ ;  $B=0,37 \cdot 10^{-22} \text{ Pa}^{-2} \text{ s}^{-0,8}$  i  $m=0,8$ ;  $B=0,26 \cdot 10^{-21} \text{ Pa}^{-2} \text{ s}^{-0,7}$  i  $m=0,7$ ;  $B=0,66 \cdot 10^{-18} \text{ Pa}^{-2} \text{ s}^{-0,3}$  i  $m=0,3$ . Na wykresie (rys. 7.9) pokazano wyniki obliczeń

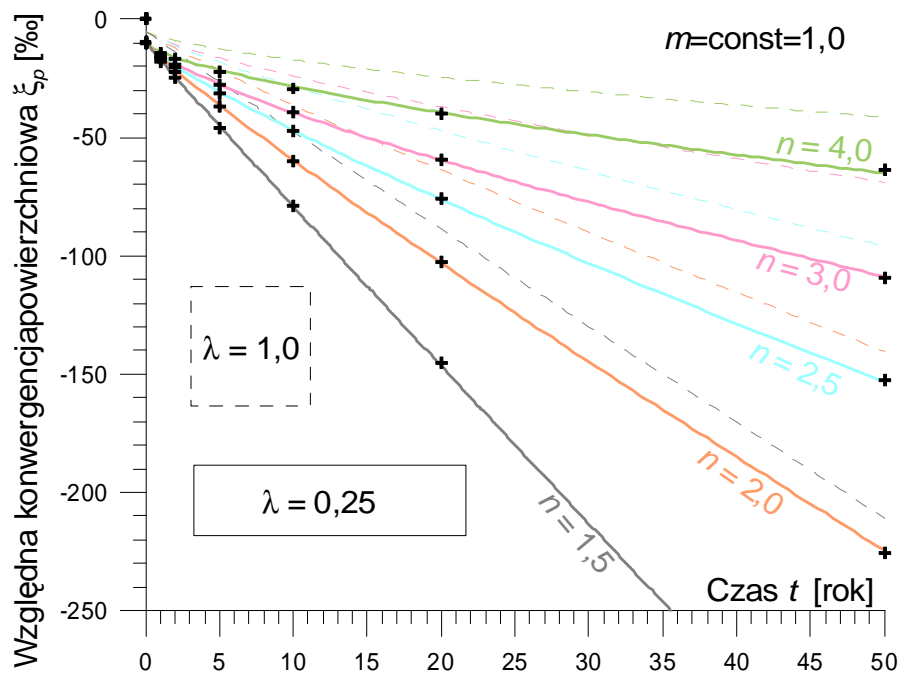
konwergencji dla różnych  $m$  w kilku krokach czasowych od  $t = 0$  do  $t = 50$  lat. Współczynniki funkcji aproksymacyjnych zebrano w tabeli 7.1 w dalszej części rozdziału.



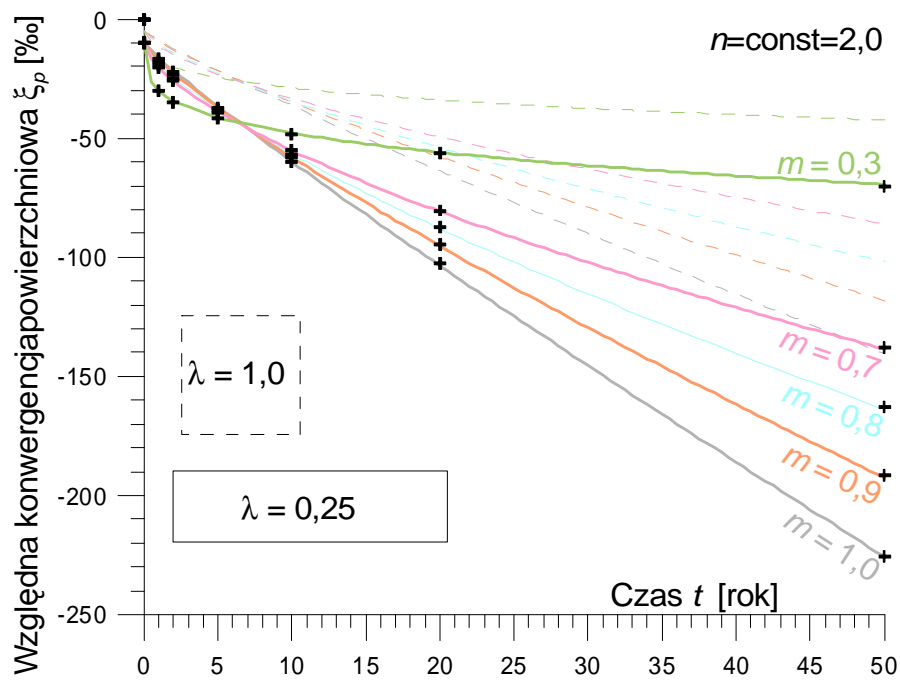
Rys. 7.9. Wpływ wykładnika przy czasie  $m$  na konwergencję powierzchniową

Zależność względnej konwergencji powierzchniowej od czasu także wyraża funkcja (7.11). Współczynniki  $c_1$  i  $c_2$  zależą tutaj od parametru  $m$ . Stwierdzono, że  $c_2$  w pierwszym przybliżeniu jest funkcją liniową  $m$ :  $c_2(m)=0,747m+0,010$ .

Po wyłonieniu zależności funkcyjnych dla chodnika o przekroju kwadratowym wykonano analogiczne obliczenia numeryczne dla chodnika prostokątnego o smukłości  $\lambda \equiv 0,25$ . Zachowano zastosowane wcześniej kryteria doboru  $B$  do parametrów  $n$  i  $m$ . Na rys. 7.10 przedstawiono wyniki obliczeń i funkcje aproksymacyjne dla  $m=1,0$  i  $n$  od 1,5 do 4,0 (linie ciągłe). Dodatkowo liniami przerywanymi powtórzono funkcje z rys. 7.8. Rys. 7.11 obrazuje wyniki obliczeń dla  $n=2,0$  i  $m$  od 0,3 do 1,0.



Rys. 7.10. Konwergencja powierzchniowa chodników dla  $m = \text{const}$



Rys. 7.11. Konwergencja powierzchniowa chodników dla  $n = \text{const}$

Wyniki obliczeń numerycznych aproksymowano funkcjami typu (7.11). W tabeli 1 zestawiono wartości współczynników funkcji aproksymujących wyniki przeprowadzonych obliczeń numerycznych dla  $m = \text{const} = 1,0$  i  $n = \text{const} = 2,0$ .

Tabela 7.1. Zestawienie współczynników funkcji aproksymacyjnych

<b><math>m=\text{const}=1,0</math></b>				
$N$	$c_2(n)$	$^{kw}c_1(n)$	$^{pr}c_1(n)$	$c = ^{kw}c_1(n) / ^{pr}c_1(n)$
1,5	0,95	-1,15	-1,81	0,635
2,0	0,91	-0,90	-1,40	0,643
2,5	0,86	-0,77	-1,20	0,642
3,0	0,81	-0,70	-1,10	0,636
4,0	0,70	-0,69	-1,07	0,645
* indeksy $kw$ i $pr$ oznaczają chodnik kwadratowy i prostokątny			średnio:	0,640
<b><math>n=\text{const}=3,0</math></b>				
$M$	$c_2(m)$	$^{kw}c_1(m)$	$^{pr}c_1(m)$	$c = ^{kw}c_1(m) / ^{pr}c_1(m)$
1,0	0,772	-4,04	-6,25	0,646
0,9	0,674	-5,01	-7,75	0,646
0,8	0,597	-5,68	-8,83	0,643
0,7	0,531	-6,19	-9,59	0,645
0,3	0,239	-9,50	-14,75	0,644
* indeksy $kw$ i $pr$ oznaczają chodnik kwadratowy i prostokątny			średnio:	0,645

Wykładniki funkcji aproksymacyjnych dobierano tak, aby  $c_2$  dla chodnika kwadratowego i prostokątnego były jednakowe. Konsekwencją tego był odpowiedni dobór współczynnika  $c_1$  w poszczególnych aproksymacjach (rys. 7.8 – 7.11 i tab. 7.1). Okazało się, że stosunek współczynników  $c = ^{kw}c_1 / ^{pr}c_1$  jest w przybliżeniu stały i wynosi około 0,64.

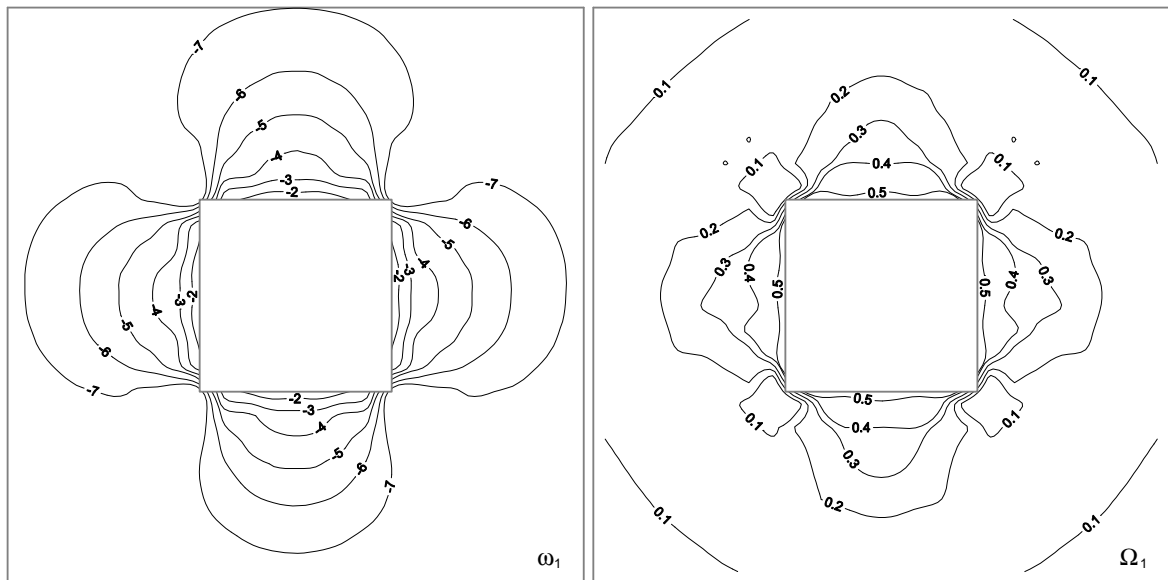
Po otrzymaniu powyższej zależności zbadano wyniki obliczeń prędkości konwergencji powierzchniowej dla różnych par  $B$  i  $n$  oraz smukłości chodnika  $\lambda = 1,0$  i  $\lambda = 0,25$  pokazanych w pracy [Maj 2008a]. Prędkość liczona była tam jako przyrost konwergencji w 20. roku zaciskania wyrobiska. Dla wszystkich przeprowadzonych tam obliczeń wartość stosunku  $^{kw}\dot{\xi} / ^{pr}\dot{\xi}$  zawierała się w przedziale 0,63 – 0,67. Porównując te wartości z otrzymanymi w ramach tej pracy stwierdza się, że wartość  $^{kw}\dot{\xi} / ^{pr}\dot{\xi} \approx 0,64$  jest niezależna od czasu. Współczynniki  $^{kw}c_1$  i  $^{pr}c_1$  są zależne od  $n$  i  $m$  ale ich stosunek jest od nich niezależny i określa relację pomiędzy konwergencjami powierzchniowymi chodników o smukłości  $^{kw}\lambda = 1,0$  i  $^{pr}\lambda = 0,25$ .

### 7.1.5. Naprężenia i odkształcenia w sąsiedztwie wyrobisk na różnych głębokościach\*

Obliczenia wykonano dla wyrobisk chodnikowych położonych na głębokościach 200 m, 300 m, 400 m, 500 m i 600 m, odpowiadającym warunkom podziemnych kopalń soli. Przyjęto następujące parametry prawa konstytutywnego:  $B = 0,74 \cdot 10^{-24} \text{ Pa}^{-n} \text{ s}^{-1}$ ,  $n = 2$ ,  $m = 1$ . W wyniku przeprowadzonych symulacji otrzymano zbiory z danymi o naprężeniach głównych, odkształceniach głównych. Na ich podstawie wyliczono dla każdego węzła wartości niezmienników Burzyńskiego:  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\Omega_1$  i  $\Omega_2$  dla czasu  $\Delta t_1 = 10$  lat i  $\Delta t_2 = 20$  lat. Niezmienniki Burzyńskiego:  $\omega_1$  i  $\omega_2$  (niezmienniki tensora naprężenia) oraz  $\Omega_1$  i  $\Omega_2$  (niezmienniki tensora odkształcenia), dla czasu  $\Delta t_1 = 10$  lat i  $\Delta t_2 = 20$  lat, wyliczono według następujących wzorów:

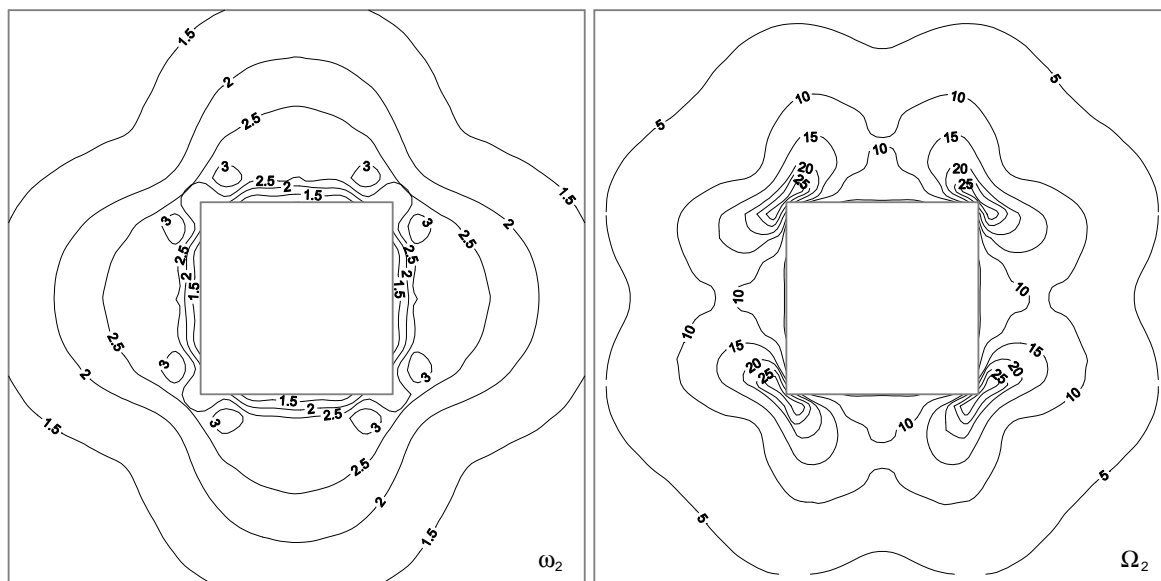
$$\begin{aligned} \omega_1 &= \sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \\ \omega_2 &= \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \\ \Omega_1 &= \varepsilon_m = \frac{1}{3}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) \\ \Omega_2 &= \frac{1}{3}\sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \end{aligned} \quad (7.13)$$

Na rys. 7.12 i 7.13 przedstawiono rozkłady wartości niezmienników wokół wyrobiska chodnikowego znajdującego się na głębokości 400 m.



Rys. 7.12. Wartości niezmienników tensora naprężenia  $\omega_1$  i  $\Omega_1$

\* Wykorzystano publikację autorki [Maj 2009]



Rys. 7.13. Wartości niezmienników tensora odkształcenia  $\omega_2$  i  $\Omega_2$

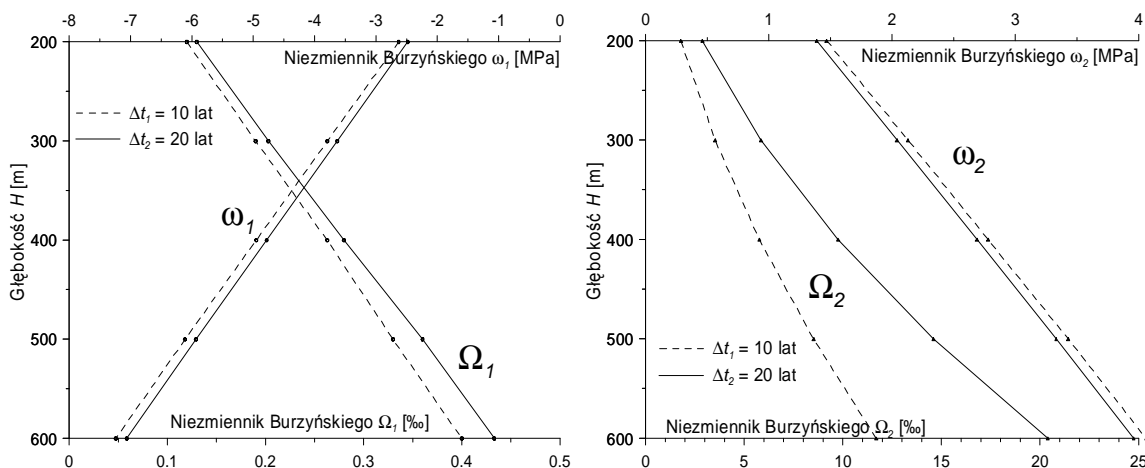
W górotworze nienaruszonym robotami górniczymi naprężenia główne na każdej założonej głębokości są sobie równe, np. na głębokości 400 m ich wartość w górotworze solnym wynosi ok. -8,6 MPa dla gradientu 21,5 kPa/m. Taka jest też wartość niezmiennika  $\omega_1$ . Utworzenie wyrobiska zmienia ten stan. Wartości naprężeń głównych różnicują się. Na konturze wyrobiska (rys. 7.12 lewy) widoczny jest spadek ich wartości  $\omega_1$ . Wraz z oddalaniem się od brzegów wyrobiska w głąb górotworu, naprężenia średnie  $\omega_1$  rosną do wartości naprężenia pierwotnego. W kierunku poziomym i pionowym, w odległości od ściany chodnika równej bokowi przekroju chodnika, naprężenia średnie  $\omega_1$  osiągają wartość 80% pierwotnego naprężenia. W narożach wyrobiska - są w przybliżeniu równe naprężeniu pierwotnemu.

Rozkład odkształcenia średniego, czyli niezmiennika  $\Omega_1$ , pokazano na rys. 7.12 (prawy). Maksymalne wartości pojawiają się na konturze wyrobiska i dochodzą do wartości 0,5%. Wraz z oddalaniem się od wyrobiska wartości odkształceń średnich maleją do zera. W odległości równej bokowi przekroju wartość odkształceń średnich  $\Omega_1$  maleje 5-krotnie.

Rozkłady niezmienników  $\omega_1$  i  $\Omega_1$  przedstawiają przyczyny i skutki zmian objętościowych w górotworze, związanych z pojawieniem się w nim wyrobiska. Natomiast zmiany postaciowe pokazać można za pomocą niezmienników Burzyńskiego  $\omega_2$  i  $\Omega_2$  (rys. 7.13).

Badania modelowe wykazały, że przedstawione rozkłady niezmienników nie zmieniają się przy zmianie głębokości wyrobiska, natomiast z głębokością rosną odpowiednio wartości

niezmienników. Dla ilościowego wyrażenia wpływu głębokości wybrano punkt położony w odległości 3 m za ociosem chodnika. Dla tego punktu obliczono wartości  $\Omega_1$ ,  $\Omega_2$ ,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  w czasie  $\Delta t_1 = 10$  lat i  $\Delta t_2 = 20$  lat i pokazano je na rys. 7.14.



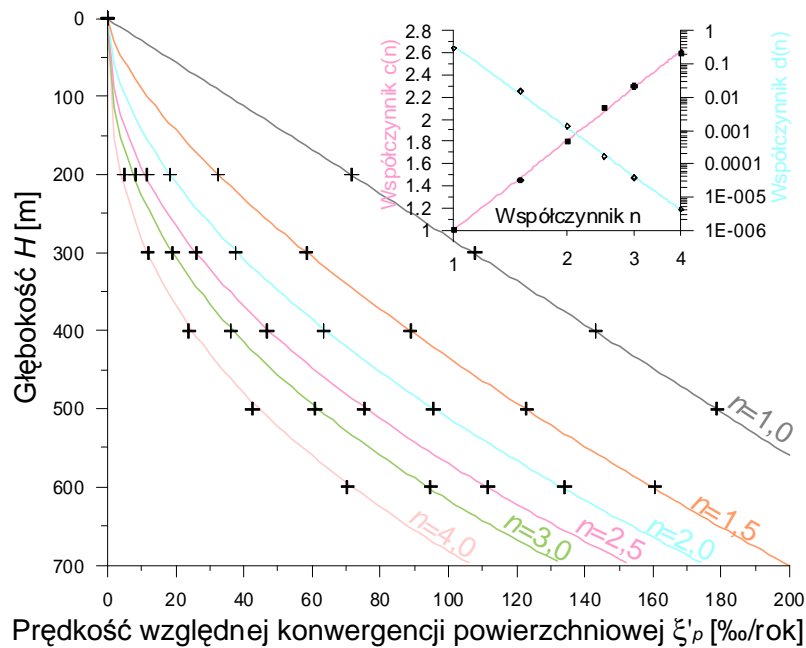
Rys. 7.14. Zależność niezmienników  $\Omega_1$ ,  $\Omega_2$ ,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  w ociose od głębokości chodnika  $H$

Przeprowadzone obliczenia przy zastosowaniu omówionego wyżej prawa konstytutywnego pokazują, że wartości niezmienników  $\omega_1$  i  $\Omega_1$  (naprężenia średnie i odkształcenia średnie) rosną z głębokością i są liniowymi funkcjami głębokości, natomiast niezmiennik  $\Omega_2$ , dla przyjętej w prawie konstytutywnym wartości  $n=2,0$  jest nieliniową funkcją głębokości (rys. 7.14).

### 7.1.6. Wpływ głębokości na konwergencję\*

Wpływy głębokości na konwergencję najprościej wyrazić można przez zależność konwergencji powierzchniowej  $\xi_p(H)$ . Obliczenia numeryczne przeprowadzono dla  $H$  równego 200 m, 300m, 400 m, 500 m i 600 m przy zmiennej wartości parametru  $n$  potęgowego prawa pełzania (6.5). Parametr  $B$  dobierano według reguły przedstawionej w rozdz. 6.2. Wyniki modelowania konwergencji przedstawiono na rys. 7.15.

\* Wykorzystano publikację autorki [Maj 2009]



Rys. 7.15. Zależność konwergencji powierzchniowej od głębokości

Wartości względnej konwergencji powierzchniowej rosną ze wzrostem głębokości. Dla  $n = 1,0$  funkcja aproksymująca wyniki obliczeń jest funkcją liniową. Gdy  $n > 1,0$  zależność ta przybiera postać funkcji potęgowej. Funkcje aproksymujące wyniki obliczeń można zapisać ogólnym wzorem w postaci:

$$\xi = d \left( \frac{H}{H_j} \right)^n, \text{ gdzie } H_j = 1 \text{ m.} \quad (7.14)$$

Parametry  $c$  i  $d$  zależą od przyjętego w modelowaniu współczynnika potęgowego  $n$  prawa pełzania (6.5). Wpływ współczynnika  $n$  na wartości parametrów  $c$  i  $d$  pokazano na wykresie górnym rys. 7.15.

## 7.2. Określenie właściwości reologicznych górotworu w kopalni Sierszowice\*

### 7.2.1. Opis sytuacji górniczej

Rozpatrywany był chodnik w kopalni w Sierszowicach, w którym mierzono konwergencję. Wyrobisko miało prostokątny przekrój o szerokości 7,1 m, wysokości 5,5 m i było jednym z czterech równolegle położonych chodników [Maj 2007a].

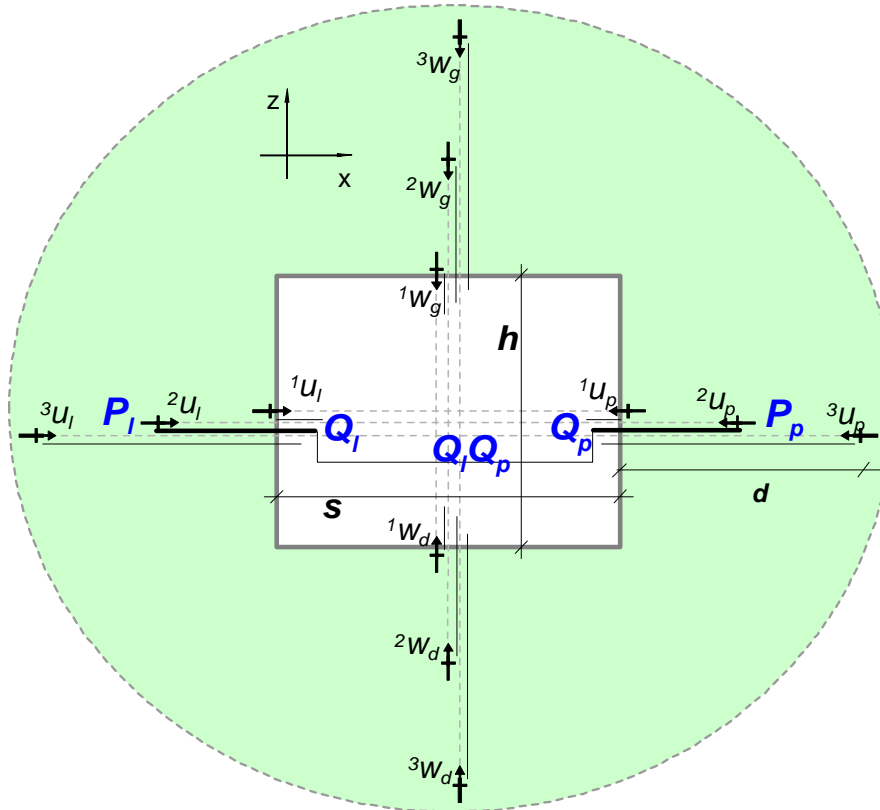
Stacja pomiarowa, której schemat przedstawiono na rys. 7.16, składała się z 3 poziomych i 3 pionowych baz. Repery powierzchniowe osadzono płytko na konturze wyrobiska a wgłębne w dwóch odległościach  $d=2,5$  i  $d=5,0$  m w głąb od konturu wyrobiska. Pomiary wykonywane były konwergenometrem teleskopowym.

Wektor przemieszczenia  $U$  w płaskim stanie odkształceń, jaki występuje w płaszczyźnie pionowej prostopadłej do poziomej osi podłużnej chodnika wyrazić można przez dwie współrzędne wektora, poziomą  $u$  i pionową  $w$ . W osi poziomej przekroju pionowego chodnika przemieszczenie to  $U(u,0)$ , a w osi pionowej  $U(0,w)$ . Jeżeli na tych kierunkach w odległości poziomej  $d_l$  i  $d_p$  od ośrodków chodnika zastabilizowane zostaną znaki pomiarowe w punktach  $P_l$  i  $P_p$ , to zmiana długości odcinka  $\Delta l(\Delta t) = P_l P_p(t + \Delta t) - P_l P_p(t)$  w czasie  $\Delta t$  będzie równa różnicy  $u_p(\Delta t) - u_l(\Delta t)$ . Zakładając, że w otoczeniu chodnika występuje symetria przemieszczeń względem jego osi oraz  $d_l = d_p = d$ , to  $\Delta l(\Delta t) = 2u(\Delta t) < 0$  dla kierunku poziomego i  $\Delta l(\Delta t) = 2w(\Delta t) < 0$  dla kierunku pionowego. Jeżeli natomiast w sąsiedztwie, w bliskiej odległości znajdują się wyrobiska, wystąpić może zakłócenie tej symetrii.

W praktyce mierniczej mierzy się odległości między punktami  $Q_l$  i  $Q_p$ , zastępując pomiar odległości między punktami  $P_l$  i  $P_p$ . Stałość odległości  $P_l Q_l$  i  $P_p Q_p$  zapewniają połączone ze zastabilizowanymi znakami sztywne pręty. W takim razie  $\Delta Q_l Q_p = \Delta P_l P_p = \Delta l$ . Ta zasada pomiaru była podstawą projektu obserwacji.

---

\* Wykorzystano publikację autorki [Maj 2007a]



Rys. 7.16. Schemat stacji pomiarowej PS-2 w Sieroszowicach

Dla wyrażenia ruchu w otoczeniu chodnika wygodniej stosować wielkości względne, czyli stosunki przemieszczeń do odpowiednich wymiarów chodnika. Wtedy względną główną konwergencję poziomą opisuje wyrażenie:  $\xi_s = ({}^1u_I - {}^1u_p)/s$ , gdzie  $s$  jest poziomym wymiarem chodnika a względną główną konwergencję pionową można opisać wzorem:  $\xi_h = ({}^1w_g - {}^1w_d)/h$ , gdzie  $h$  jest pionowym wymiarem. Porównując przemieszczenia wygodnie będzie także stosować wartości względne dla baz między punktami w odległości  $d$  od ośrodku chodnika.

### 7.2.2. Wyniki pomiarów konwergencji

Wyniki pomiarów aproksymowano funkcją potęgową, w taki sposób, aby otrzymać jednakowy wykładnik zmiennej czasowej dla wszystkich baz. Ogólnie funkcje można napisać w formie:

$$\begin{aligned} \xi_h(t) &= c_1(d)(c_2 - 0,27t^{0,745}) \\ \xi_s(t) &= \lambda c_3(d)(c_4 - 0,27t^{0,745}) \end{aligned} \quad (7.15)$$

gdzie  $c_i(d)$  są parametrami zależnymi od odległości stabilizacji znaku od konturu chodnika.

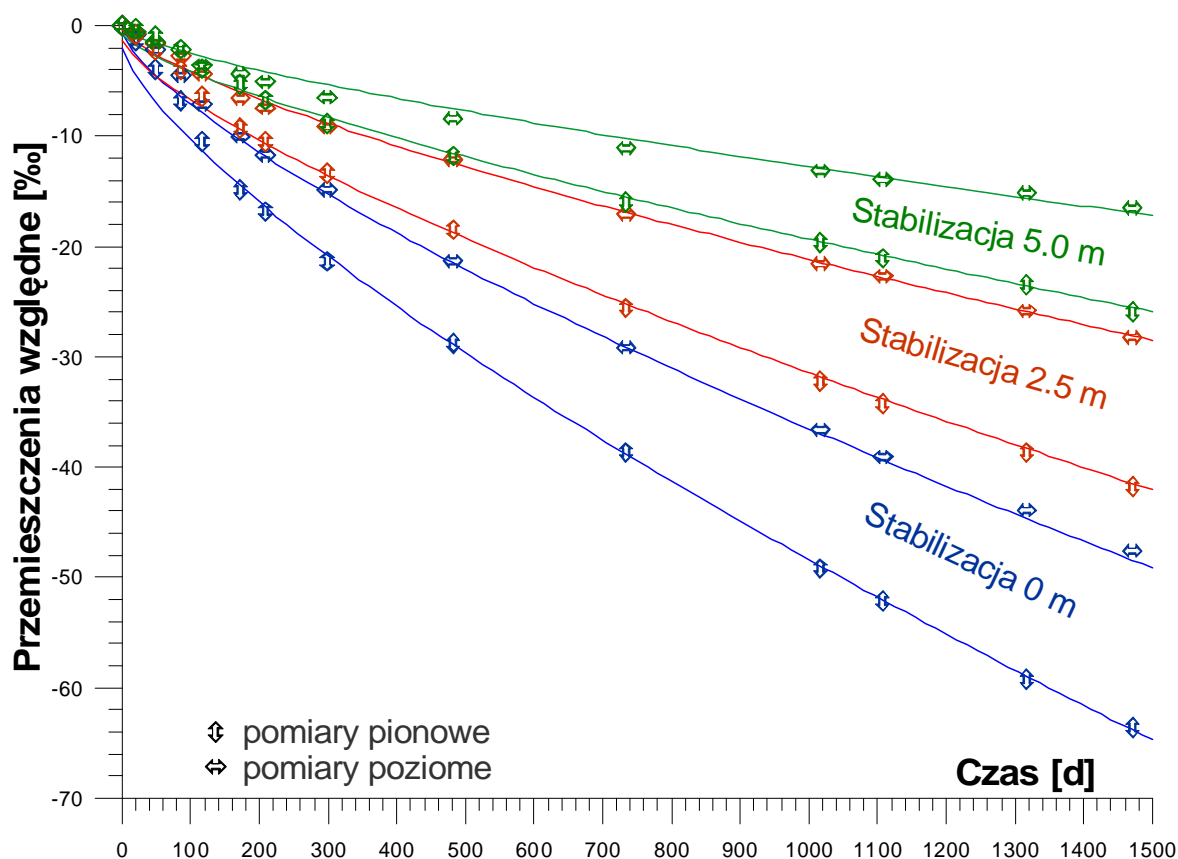
Parametry  $c_1$  i  $c_3$  w pierwszym przybliżeniu określano z proporcji  $h/(h+d)$  i  $s/(s+d)$  otrzymując współczynniki odpowiednio dla  $h/(h+d)$ : 1,00; 0,55; 0,35 oraz dla  $s/(s+d)$ : 1,00; 0,58; 0,41. Współczynnik  $c_2$  przyjęto -2,0 i  $c_4=-0,92$ . Wartości  $h/(h+d)$  wprowadzono do wzorów aproksymujących konwergencję  $\xi_s$ , a  $s/(s+d)$  do wzorów dla  $\xi_h$ . Ostatecznie dokonano niewielkich korekt współczynników, otrzymując wzory funkcji potęgowych w postaci:

$$\text{dla } d=0 \text{ m: } \quad \xi_h(t)=1,00*(-2,0-0,27t^{0,745}); \quad \xi_s(t)=1,00*0,77*(-0,92-0,27t^{0,745}),$$

$$\text{dla } d=2,5 \text{ m: } \quad \xi_h(t)=0,65*(-2,0-0,27t^{0,745}); \quad \xi_s(t)=0,58*0,77*(-0,92-0,27t^{0,745}),$$

$$\text{dla } d=5,0 \text{ m: } \quad \xi_h(t)=0,40*(-2,0-0,27t^{0,745}); \quad \xi_s(t)=0,35*0,77*(-0,92-0,27t^{0,745}).$$

Dane pomiarowe i funkcje aproksymacyjne przedstawiono na rys. 7.17.



Rys. 7.17. Wyniki pomiarów konwergencji w chodniku PS-2 i funkcje aproksymujące wyniki pomiarów

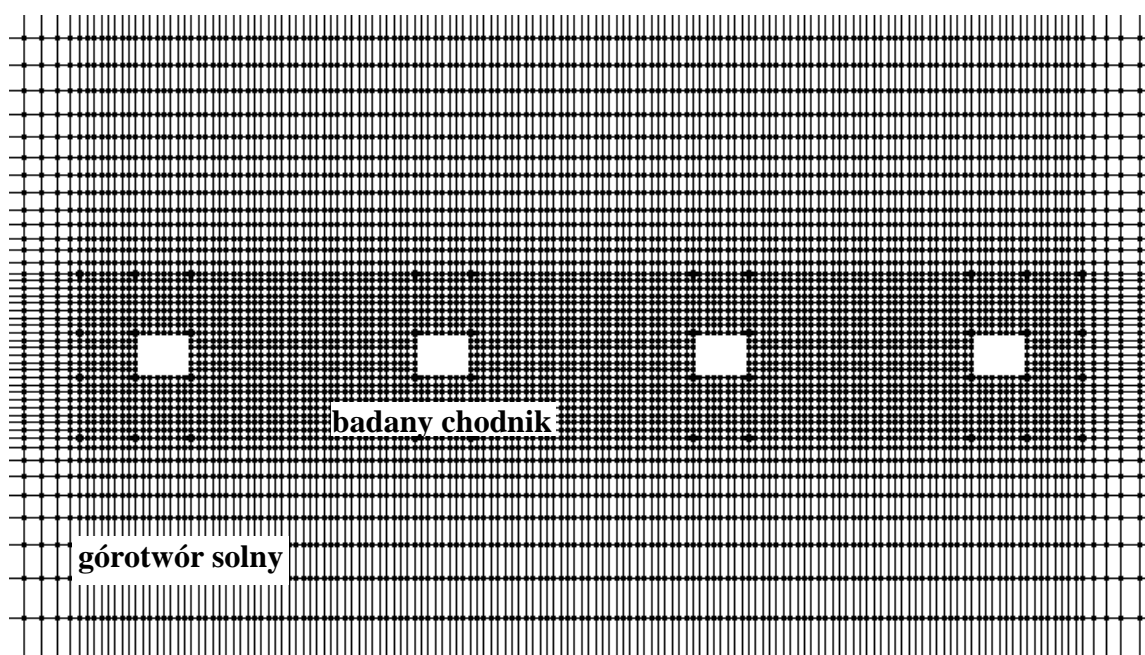
Zwrócić trzeba uwagę, że w funkcjach aproksymacyjnych występuje jedna wartość wykładnika przy czasie 0,745 dla wszystkich baz. Zbliżone wartości wykładnika (0,762 i 0,770) otrzymano aproksymując konwergencje w komorach pola 2 w kopalni Kłodawa w okresie 30 lat obserwacji [Kortas 2008].

Zgodnie ze wzorem (7.11) z rozdz. 7.1.4: konwergencja jest funkcją potęgową czasu,  $\xi(t) - \xi = \xi_j (t/t_j)^c$ , gdzie  ${}^e\xi$  jest konwergencją natychmiastową, a  $\xi_j = \xi(t_j)$  jest przyrostem konwergencji w czasie  $t_j$  od utworzenia wyrobiska. Współczynnik potęgowy przy czasie był  $c=0,745$ , a  $\lambda=h/s=0,77$ . Ponieważ postać funkcji aproksymacyjnych odpowiada formie wzoru (7.11), to między współczynnikami  $\{c_i\}$  a parametrami wzoru (7.11) zachodzą następujące związki:

$${}^e\xi_h = c_1(d)c_2; {}^v\xi_h = 0,27 * c_1(d); {}^e\xi_s = \lambda c_3(d)c_4; {}^v\xi_s = 0,27 * c_3(d). \quad (7.16)$$

### 7.2.3. Analiza zachowania się górotworu

Model geometryczny dostosowany został w przybliżeniu do sytuacji górniczej Sieroszowic przez wprowadzenie czterech równoległych chodników. Zastosowano następujące parametry modelu: szerokość chodników  $s=7,1$  m, wysokość chodników  $h=5,5$  m, szerokość filara  $f=28$  m. Model geometryczny górotworu po dyskteryzacji pokazano na rys. 7.18.

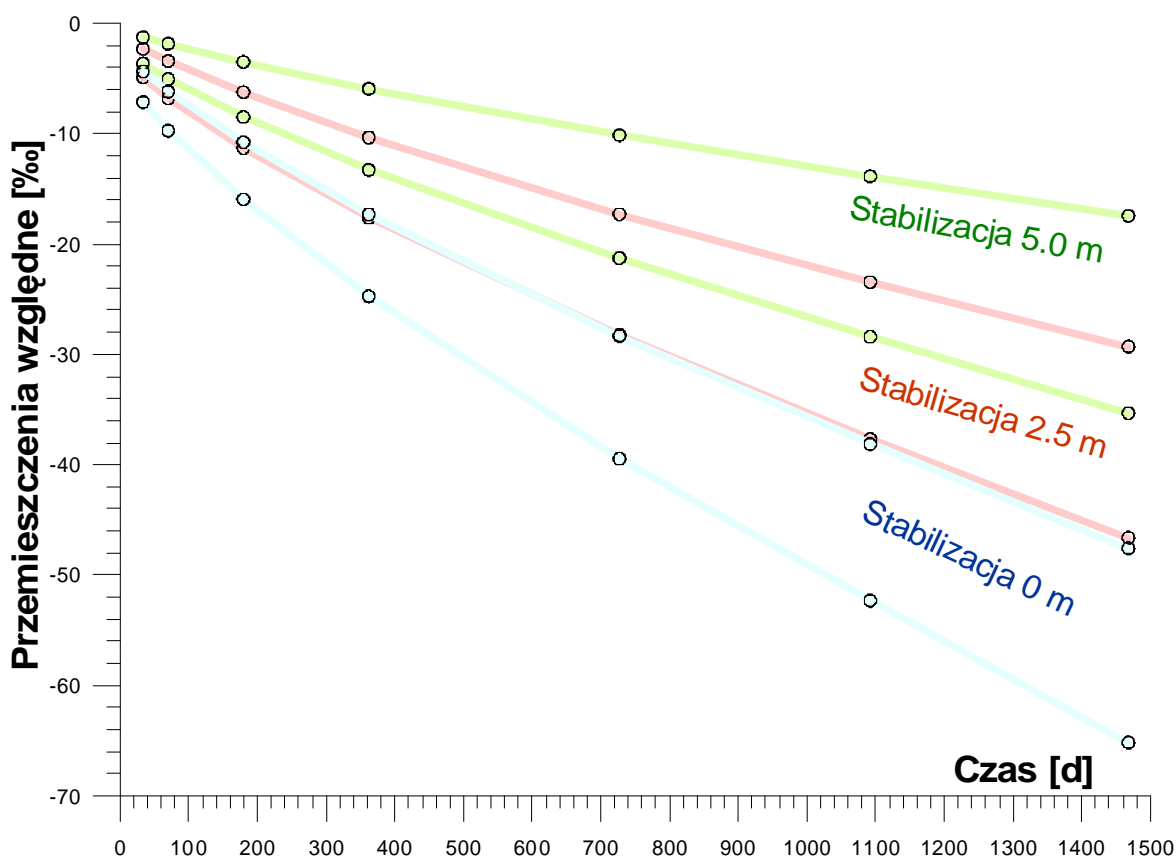


Rys. 7.18. Fragment sieci węzłów wokół wyrobiska

Kolejną czynnością były poszukiwania parametrów sprężystych i lepkich przyjętego w modelu konwergencji prawa konstytutywnego, tj.  $E$ ,  $\nu$ ,  $B$ ,  $n$  i  $m$ . Z rozdz. 7.1 wynika, że w fazie pełzania  $E$  i  $\nu$  nie wpływają w sposób istotny na konwergencję, natomiast brak jest

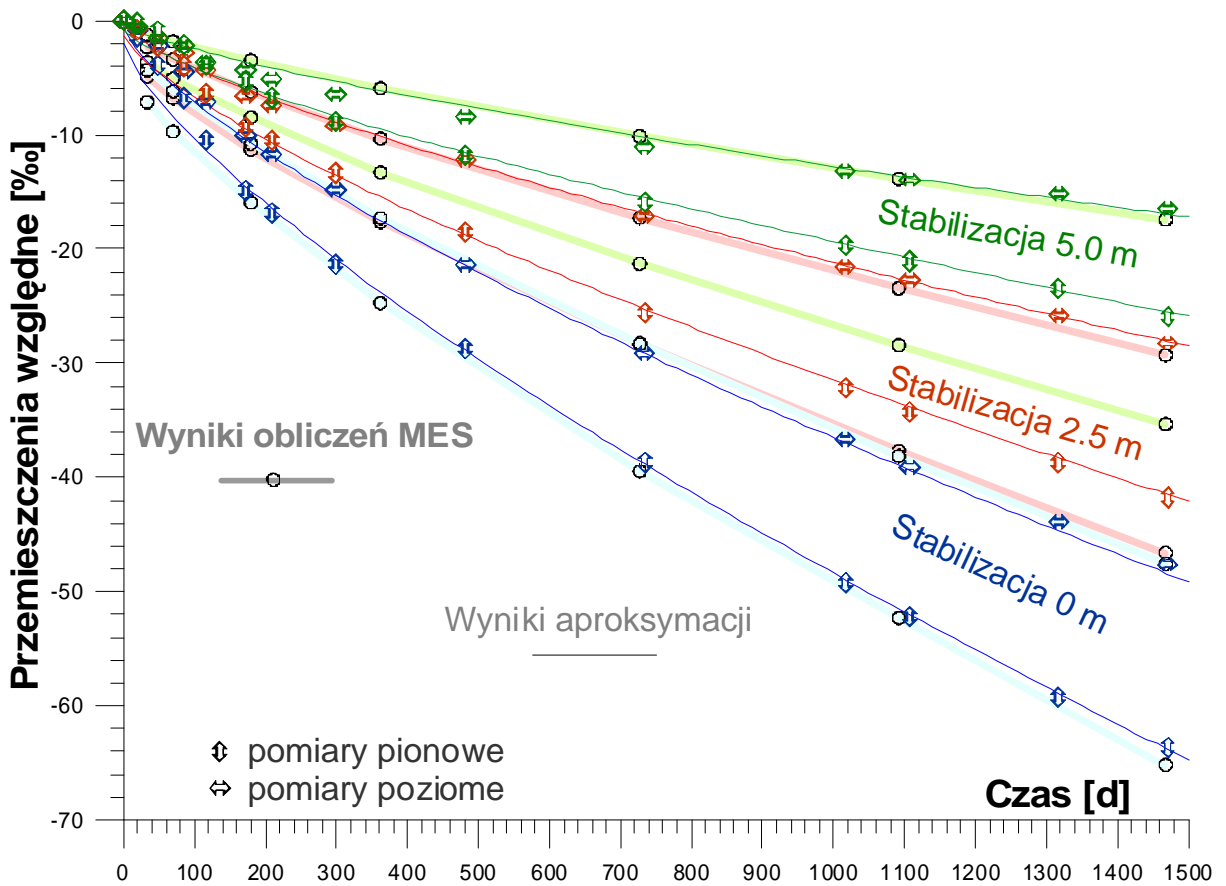
danych o najwcześniejszym okresie zachowania chodnika. W symulacjach przyjęto  $E = 9 \text{ GPA}$  i  $\nu = 0,3$ .

Z badań nad wpływem czasu na konwergencję (rozd. 7.1.4) wynikało, że można przyjąć  $n \sim 3$  i  $m=1$  lub  $n \sim 2$  i  $0,745 < m < 1$ . Reologiczne badania laboratoryjne soli z tego rejonu kopalni przeprowadzone zostały w Laboratorium Geomechanicznym Wydziału Górniczego AGH przez D. Flisiak. Wyniki tych badań wykazały, że dla prawa Nortona  $n=1,96$  [Badania... 2005]. Z tego względu do dalszych symulacji przyjęto  $n=2$ , różnicując wartości parametru  $m$  – współczynnika potęgowego przy czasie w zakresie od 0,75 do 0,95. W serii zadań ze zmiennym parametrem  $m$  odpowiednio zmieniano okres wstępnego pełzania górotworu bez wyrobisk dla uzyskania hydrostatycznego stanu naprężeń pierwotnych jako warunku początkowego. Najlepszą zgodność z wynikami pomiarów uzyskano dla  $m=0,82$ ,  $B=0,32 \cdot 10^{-23}$ ;  $n=2,0$ . Parametry te charakteryzują właściwości lepkie górotworu w otoczeniu obserwowanego chodnika. Na rys. 7.19 przedstawiono wyniki MES i ich aproksymacje.



Rys. 7.19. Wyniki obliczeń modelem konwergencji dla Sieroszowic

Porównanie wyników obliczeń modelowych, pomiarów i ich aproksymacji przedstawiono na rysunku zbiorczym (rys. 7.20).



Rys. 7.20. Wyniki pomiarów, obliczeń modelowych i funkcje aproksymacyjne

Uznać można, że ten zestaw wartości parametrów określa pełzanie górotworu wyłącznie na podstawie omówionego powyżej sposobu pomiaru. Wyniki obliczeń modelem konwergencji pokrywają się z wynikami pomiarów konwergencji pionowej i poziomej oraz w wynikami pomiarów przemieszczeń poziomych w głębi górotworu, czyli zgodność otrzymano dla 4 z 6 krzywych. Wyniki obliczeń przemieszczeń pionowych mają większe wartości niż wynika to z pomiarów. Spowodowane jest to nieuwzględnieniem w modelu występującego nad solą pokładu anhydrytu, którego wpływ – ograniczający przemieszczenia – zaznaczył się w wynikach pomiarów geodezyjnych. Widoczne też są rozbieżności w pierwszym okresie prowadzenia pomiarów. Brakuje wyników obserwacji najwcześniejszego okresu bezpośrednio po wydrążeniu wyrobiska. Pozwoliłoby to na dopasowanie wartości parametrów sprężystych górotworu.

Zastosowany model 2D przybliżył sytuację wyrobisk w Sieroszowicach, jednak w celu dokładniejszego odwzorowania właściwsze byłoby skonstruowanie modelu 3D, dlatego otrzymane tu wyniki należy traktować to jako wstępne oszacowanie wartości lepkich

górotworu solnego tego rejonu złoża, które może stanowić w przyszłości podstawę dla bardziej zaawansowanych modeli.

### 7.3. Podsumowanie i wnioski

Opracowany w rozdziale 6 model konwergencji zastosowano do wyłonienia zależności konwergencji od właściwości sprężystych i lepkich górotworu, głębokości i smukłości chodnika oraz czasu. Określono proste związki funkcyjne między konwergencją a modułem Younga  $E$ , smukłością  $\lambda$ , głębokością  $H$ , czasem  $t$ , parametrem prawa pełzania  $n$ . Pokazano wpływ parametrów prawa pełzania  $n$  i  $m$  na kształt funkcji określającej zależność konwergencji od czasu.

Wykazano, że zależność konwergencji od logarytmu smukłości  $\lambda$  chodnika jest funkcją paraboliczną a zależność od modułu Younga  $E$  funkcją hiperboliczną. Funkcja potęgowa opisuje oddziaływanie czasu i głębokości wyrobiska na konwergencję. Związki te mogą służyć wyrażaniu wartości tych wielkości w oparciu o odpowiednio przeprowadzone pomiary konwergencji. Wyniki symulacji mają więc zastosowanie praktyczne w interpretacji wyników geodezyjnych pomiarów konwergencji.

Przykładem wykorzystania modelu do określania wyników wartości parametrów lepkich jest analiza wyników pomiarów konwergencji w Sieroszowicach. Uzyskano zadowalającą zgodność wyników symulacji z wynikami pomiarów konwergencji dla następujących wartości prawa pełzania:  $B=0,32 \cdot 10^{-23}$ ;  $n=2,0$ ;  $m=0,82$ . Zatem pomiar konwergencji prowadzić może do określenia właściwości górotworu.

## 8. Poszerzony model konwergencji z uwzględnieniem innych czynników geologiczno-górnich

Model konwergencji przedstawiony w poprzednim rozdziale jest idealizacją warunków geologiczno – górniczych. Zakładano na przykład, że wyrobisko to pojedynczy, poziomy, bardzo długi chodnik o prostokątnym przekroju poprzecznym, utworzony natychmiastowo. Warunki geologiczne wystarczająco charakteryzuje jednorodność, a górotwór zachowuje ciągłość mimo postępującej jego deformacji. W przyjętym modelu uwzględniona została jedynie zmienność smukłości i głębokości chodnika oraz parametrów fizycznych w całym obszarze górotworu. Otrzymane więc w wyniku obliczeń konwergencje odnoszą się do tak uproszonych warunków geologiczno-górnich. Dlatego nazywać można go modelem podstawowym.

Takich sytuacji górniczych w kopalniach soli nie ma. W rzeczywistości wyniki pomiarów konwergencji często odbiegają od otrzymanych w procesie modelowania. Występuje bowiem szereg czynników geologiczno-górnich, nieuwzględnionych w modelu, a wpływających znacząco na konwergencję. Warunkiem jednak wyłonienia wpływu takich dodatkowych czynników jest możliwość odniesienia zmierzonych konwergencji do podstawowego modelu konwergencji. Sposoby i przykłady uwzględnienia kilku z tych czynników w poszerzonym modelu konwergencji są przedstawione w tym rozdziale.

### 8.1. Podział czynników wpływających na konwergencję

Wpływ podstawowych wielkości wprowadzonych do modelu omówiono w rozdz. 7.1. Niezgodność wyników obliczeń podstawowym modelem konwergencji (rozdz. 6) z wynikami pomiarów *in-situ* wynika ze złożoności warunków geologiczno-górnich. Wpływające na to czynniki można podzielić na geometryczne i fizyczne. Czynniki geometryczne wynikają ze zmiennej w czasie lub przestrzeni geometrii wyrobiska chodnikowego i zaliczyć do nich można:

- postęp czoła chodnika w czasie,
- obecność sąsiadujących wyrobisk,
- kolejność powstawania sąsiadujących wyrobisk,

- nieprostokątny kształt przekroju chodnika,
- nieprostoliniowy przebieg chodnika,
- nachylenie chodnika,
- przybierki spągu i ociosów.

Do zmieniających się w czasie lub przestrzeni czynników fizycznych należą:

- niehydrostatyczny stan naprężeń pierwotnych,
- niestałość temperatury i wilgotności,
- zróżnicowanie właściwości fizycznych górotworu,
- lokalne przekroczenia wytrzymałości skał,
- obecność obudowy i innych zabezpieczeń chodnika,
- obecność medium wypełniającego wyrobisko.

Czynniki geometryczno-fizyczne wynikają z budowy i litologii utworów różniących się właściwościami fizycznymi. Należą do nich w szczególności uwarstwienie górotworu, pofałdowanie, uskoki, grotty solne, obecność ługów macierzystych.

Niezgodność wyników obliczeń z wynikami pomiarów spowodowane być może też przez niedostateczne rozeznanie stanu górotworu:

- obecność niezidentyfikowanych lub niezinventaryzowanych wyrobisk,
- nieudokumentowana geologicznie istotna dla konwergencji zmienność litologiczna skał,
- brak odpowiednich danych o zawilgoceniach górotworu,
- brak potrzebnych laboratoryjnych oznaczeń właściwości geomechanicznych.

Wskazać też należy na czynniki pomiarowe wpływające na wynik obserwacji.

W szczególności należy do nich:

- niedostosowanie metody pomiaru do warunków geologiczno-górnich,
- niedostosowanie częstotliwości pomiaru do jego dokładności i prędkości zaciskania,
- uszkodzenia znaków pomiarowych,
- niesprawne działanie urządzeń pomiarowych.

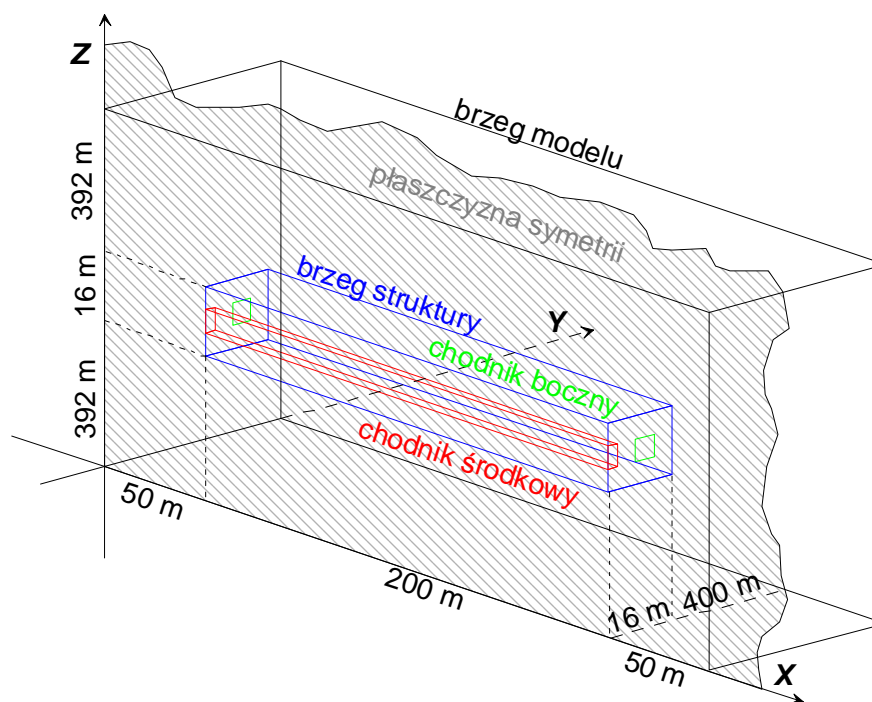
W dalszej części rozdziału szczegółowiej przedstawiony zostanie wpływ postępu w drażeniu chodnika, obecności sąsiadujących wyrobisk na konwergencję chodnika i kolejności ich powstawania, przy wykorzystaniu rozbudowanego modelu trójwymiarowego z czasem. Wpływ zróżnicowania właściwości fizycznych w czasie i przestrzeni przedstawiono dla symulacji zmian temperatury i wilgotności górotworu, uwarstwienia górotworu oraz obecności mediów wypełniających wyrobisko.

## 8.2. Wpływ zmiennej geometrii wyrobisk

### 8.2.1. Opis modelu 3D+t

Zmienna w czasie i przestrzeni geometria wyrobisk jest jednym z istotniejszych czynników powodujących rozbieżność wyników modelowania w dwuwymiarowej przestrzeni z wynikami pomiarów geodezyjnych. Nie można bowiem prawidłowo odwzorować zmienności konwergencji w trakcie postępu chodnika oraz wpływu wyrobisk w jego otoczeniu. Konieczna jest konstrukcja modelu trójwymiarowego.

W tym celu rozbudowano podstawowy model konwergencji. Model geometryczny stanowił prostopadłościan o wymiarach 300 m x 416 m x 800 m (rys. 8.1). Jedną ze ścian stanowiła płaszczyznę symetrii. Prostopadłościan został podzielony na elementy prostopadłościennie ośmiowęzłowe. W obrębie struktury węzły rozmieszczane były równomiernie. Wraz ze zbliżaniem się do brzegów prostopadłościanu zmniejszano gęstość siatki. Zastosowano przemieszczeniowe warunki brzegowe. Górna płaszczyzna prostopadłościanu, odpowiadająca powierzchni terenu, była nieobciążona i mogła się dowolnie przemieszczać.

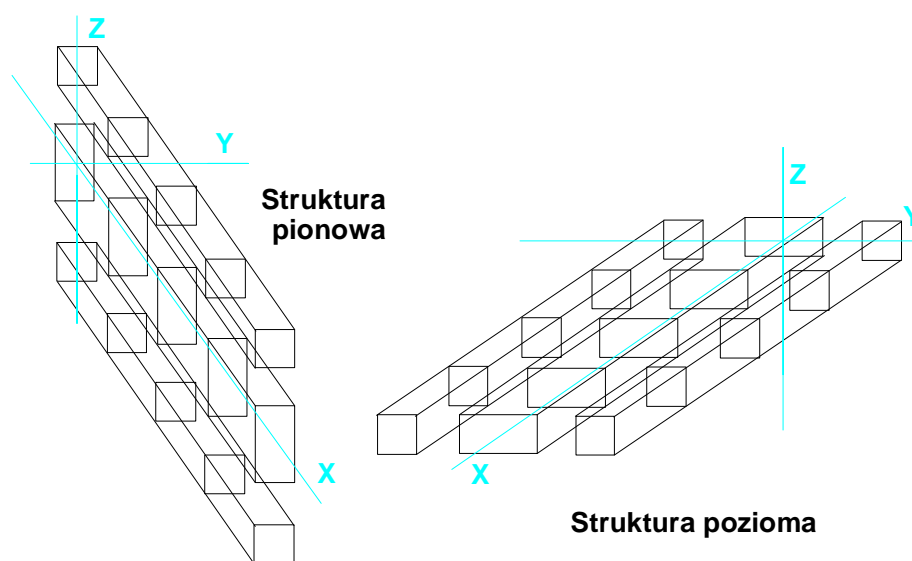


Rys. 8.1. Schemat trójwymiarowego modelu chodnika

Model fizyczny i matematyczny opisano w rozdz. 6.1. Zastosowano następujące wartości parametrów prawa materiałowego:  $\rho=2200 \text{ kg/m}^3$ ,  $E=15\text{GPa}$ ,  $\nu=0,3$ ,  $B=1,2*10^{-24} \text{ Pa}^{-2}\text{s}^{-1}$ ,  $n=2,0$ ,  $m=1,0$ . Warunkiem początkowym był hydrostatyczny stan naprężenia pierwotnego uzyskany we wstępnej symulacji procesu pełzania górotworu.

Rozważano dwa typy struktury wyrobisk: pionową i poziomą, w której znajdowały się poziome, prostopadłościenne chodniki. Struktura pozioma oznacza tu obszar górotworu obejmujący 3 chodniki z 2 filarami między nimi, a struktura pionowa obejmuje 3 chodniki i 2 półki między nimi (rys. 8.2). Obszar każdego z chodników podzielono na cztery 50-metrowe segmenty, które podczas obliczeń były usuwane (lub nie) wzdłuż osi  $X$  w zależności od zadanego schematu procesu drążenia wyrobiska (rozdz. 8.2.2).

Wybieranie złoza następowało w trakcie procesu pełzania górotworu. Kroki obliczeniowe dobierano odpowiednio dla okresu przed usunięciem elementów i dla każdego etapu w trakcie wybierania złoza i po nim. Na podstawie obliczonych w programie Cosmos/M przemieszczeń we wszystkich tak dobranych fazach wyliczano konwergencje

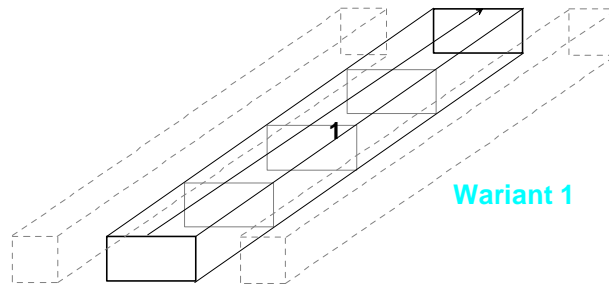


Rys. 8.2. Struktura pionowa i pozioma modelu 3D

### 8.2.2. Warianty drążenia chodników

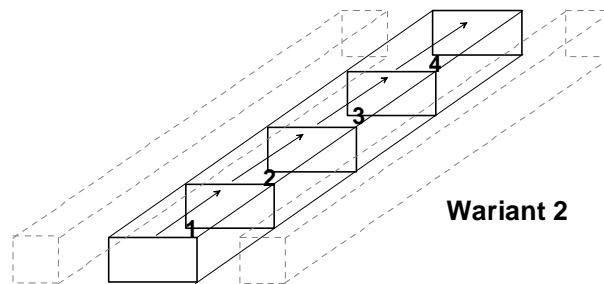
Badano następujące przypadki postępu eksploatacji (kolory na rys. 8.3 - 8.7 odnoszą się także do wykresów na rys. 8.8 - 8.11):

- 1 chodnik środkowy, znajdujący się w całości (brak sąsiadujących wyrobisk) wybierany jest w całości w jednym momencie, po czasie  $\Delta t_{lito}$ ;



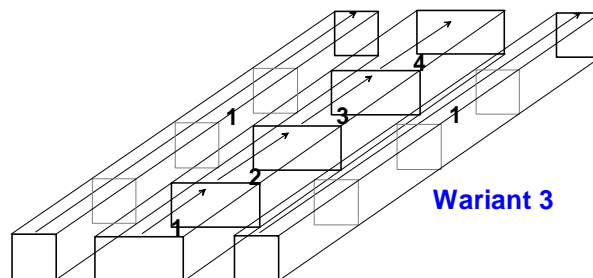
Rys. 8.3. Wariant 1 rozważanych schematów eksploatacji

- 2 chodnik środkowy znajdujący się w caliznie (brak sąsiadujących wyrobisk) wybierany jest segmentami, pierwszy segment wybierany jest po czasie  $\Delta t_{lito}$ , pozostałe segmenty wybierane są w odstępach 2-letnich;



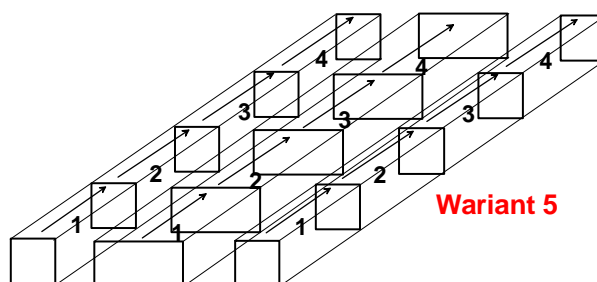
Rys. 8.4. Wariant 2 rozważanych schematów eksploatacji

- 3 chodnik środkowy wybierany jest segmentami, pierwszy segment wybierany jest równocześnie z wszystkimi segmentami chodników sąsiednich - dotyczy to struktury poziomej z prawym i lewym chodnikiem i struktury pionowej z górnym i dolnym chodnikiem; następne segmenty chodnika środkowego wybierane są w odstępach 2 letnich;



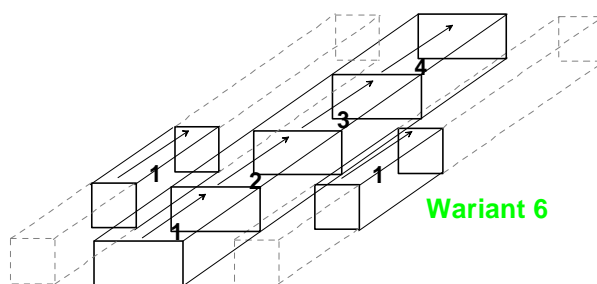
Rys. 8.5. Wariant 3 rozważanych schematów eksploatacji

- 4 chodnik środkowy wybierany jest segmentami, pierwszy segment wybierany jest równocześnie ze wszystkimi segmentami chodnika górnego **lub** dolnego, pozostałe segmenty chodnika środkowego wybierane są w odstępach 2-letnich; jest to szczególny przypadek wariantu 4 dla struktury pionowej;
- 5 wszystkie trzy chodniki (w strukturze poziomej i pionowej) wybierane są segmentami w odstępach 2-letnich.



Rys. 8.6. Wariant 5 rozważanych schematów eksploatacji

- 6 chodnik środkowy wybierany jest segmentami, pierwszy segment wybierany jest równocześnie z drugimi segmentami chodników bocznych w strukturze poziomej lub górnego i dolnego w strukturze pionowej, pozostałe segmenty chodnika środkowego wybierane są w odstępach 2-letnich;

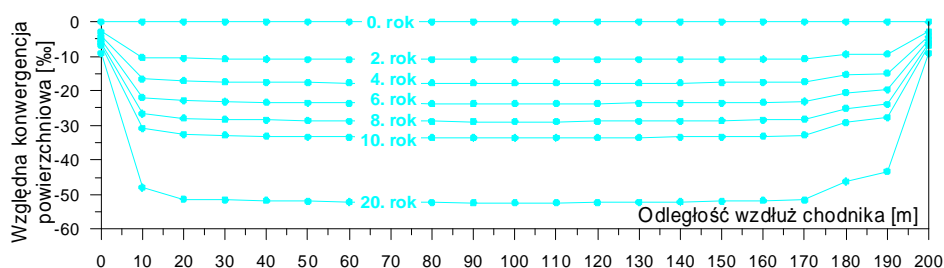


Rys. 8.7. Wariant 6 rozważanych schematów eksploatacji

### 8.2.3. Opis wyników

We wstępnej serii obliczeń rozszerzonym modelem konwergencji 3D zbadano prawidłowość stosowania podstawowego modelu 2D z zastosowaniem płaskiego stanu odkształcenia,

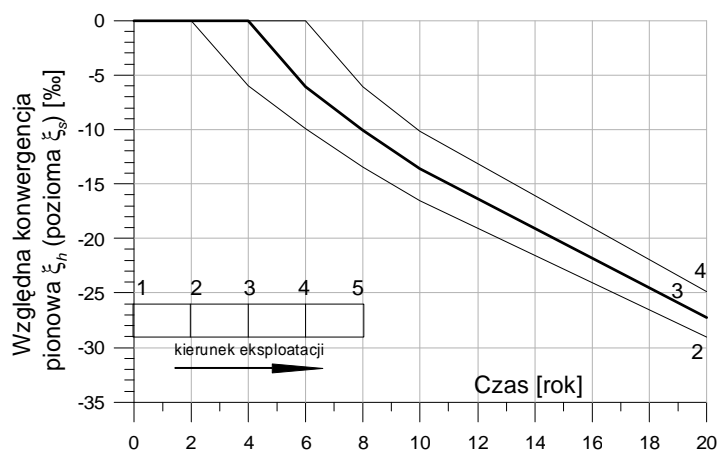
w którym wydrążenie chodnika następuje w jednej chwili. Obliczenia numeryczne przeprowadzono dla 6 okresów procesu zaciskania wyrobiska. Obliczono konwergencję powierzchniową w 21 przekrojach pionowych chodnika. Wyniki obliczeń pokazano na rys. 8.8.



Rys. 8.8. Konwergencja powierzchniowa chodnika w modelu 3D

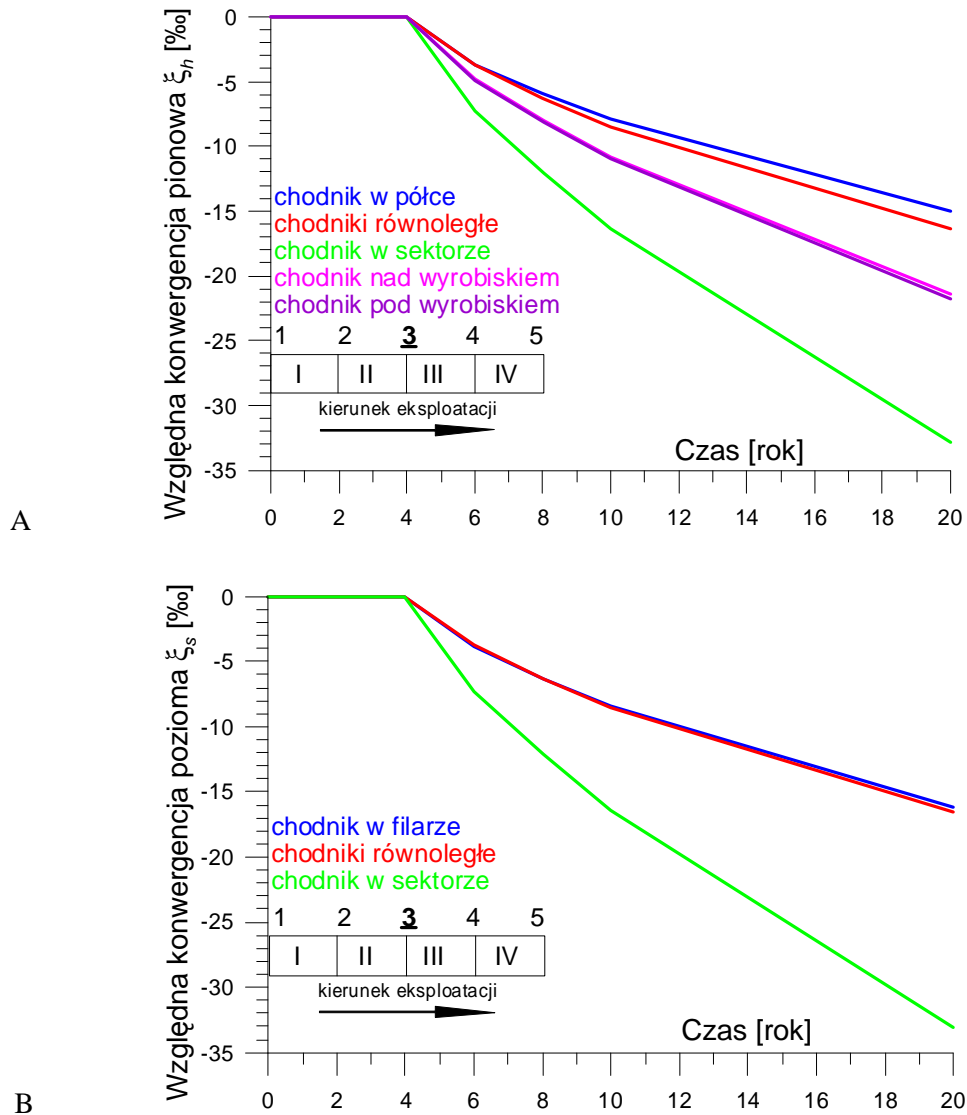
W każdym z badanych przekrojów chodnika, poza 20-30 metrowymi obszarami na początku i końcu wyrobiska, konwergencja powierzchniowa miała takie same wartości dla każdego rozpatrywanego okresu czasu i odpowiadała konwergencji powierzchniowej uzyskanej w płaskim stanie odkształcenia. Badając zachowanie się chodnika, można więc zastąpić uciążliwe i czasochłonne obliczenia numeryczne stanu przestrzennego dużo prostszym płaskim stanem odkształcenia.

Najprostszym przypadkiem jest pojedynczy chodnik w caliznie, bez sąsiedztwa innych wyrobisk, eksploatowany segmentami. Wyniki obliczeń dla chodnika o przekroju kwadratu wykazały, że podobnie jak w przestrzeni 2D konwergencja pozioma jest równa pionowej. Zmiany konwergencji na granicach poszczególnych segmentów przedstawiono na rys. 8.9.



Rys. 8.9. Postęp chodnika w caliznie bez obecności innych wyrobisk

Poniżej przedstawiono wyniki obliczeń dla chodników, w sąsiedztwie których symulowano eksploatację. Na rys. 8.10.A pokazano pionową konwergencję środkowego, 3 przekroju chodnika w strukturze pionowej, a na rys. 8.10.B poziomą konwergencję w strukturze poziomej dla różnych sytuacji górniczych.



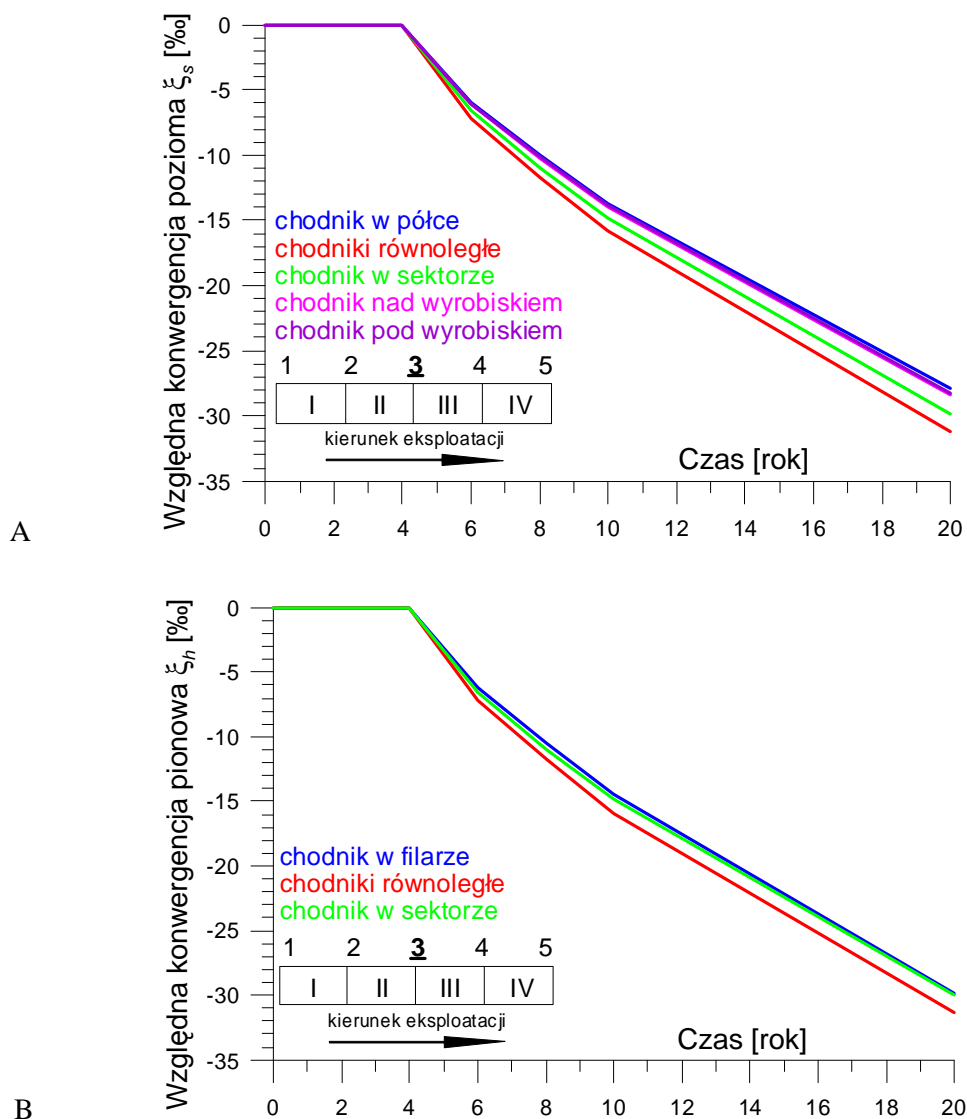
Rys. 8.10. Konwergencja pionowa w strukturze pionowej (A) i konwergencja pozioma w strukturze poziomej (B)

Analiza wyników prowadzi do następujących spostrzeżeń:

- największe wartości osiąga konwergencja pionowa w przypadku przechodzenia z eksploatacją w sąsiedztwie wyeksploatowanego segmentu,
- konwergencje w czasie są jednakowe, niezależnie od tego, czy eksploatacja przechodzi *nad* czy *pod* istniejącym chodnikiem,

- wykresy konwergencji dla środkowego chodnika w przypadku postępu chodnika między istniejącymi już wyrobiskami i dla trzech chodników prowadzonych równoległe są jednakowe,
- rozpatrując przypadek prowadzenie dwóch równoległych chodników w półce między nimi obserwuje się rozciągania, analogicznie będzie dla filara w strukturze poziomej.

Konwergencja pozioma w strukturze pionowej, a także konwergencja pionowa w strukturze poziomej zachowują się odmiennie. Ich wykresy przedstawia rys. 8.11.



Rys. 8.11. Konwergencja pozioma w strukturze pionowej (A) i konwergencja pionowa w strukturze poziomej (B)

Konwergencja pozioma w strukturze pionowej i konwergencja pionowa w strukturze poziomej we wszystkich rozpatrywanych schematach eksploatacji zachowuje się podobnie

z nieznaczącymi różnicami w wartościach. Obecność wyrobisk nad lub pod obserwowanym chodnikiem nie wpływa znacząco na konwergencję poziomą a na konwergencje pionową w niewielkim stopniu ma wpływ obecność wyrobiska za odciosem badanego chodnika.

Przeprowadzone studia zaciskania drażonych chodników i wpływu obecności sąsiadujących wyrobisk prowadzą do następujących wniosków:

- modelując sytuację górnictwiczną można zaobserwować przemieszczenia punktów w górotworze zanim stały się one częścią konturu wyrobiska; pomiarami możemy objąć tylko okres po wybraniu złoża z badanego przekroju;
- konwergencja pozioma w strukturze pionowej i pionowa w poziomej są podobne co do wartości i zmienności w czasie; analogicznie podobnie jest dla konwergencji pionowej w strukturze pionowej i poziomej w poziomej;
- sytuacja górnictwiczna wybieranego chodnika nie wpływa znacząco na konwergencję poziomą w strukturze pionowej i pionową w strukturze poziomej;

Obserwując zaciskanie chodnika w strukturze pionowej należy przede wszystkim zakładać bazy poziome, ponieważ uniknie się wpływu obecności sąsiednich wyrobisk, w strukturze poziomej - bazy pionowe.

### **8.3. Wpływ zmiennych właściwości fizycznych górotworu i wypełnienia wyrobiska**

Podstawowy model konwergencji, opisany w rozdz. 6, dostosowywano do potrzeb analizy wpływu zmiennych właściwości fizycznych górotworu. Wpływ temperatury i wilgotności oraz uwarstwienia górotworu pokazano, uwzględniając w modelu zmianę właściwości geomechanicznych, wpływ wypełnienia wyrobiska płynami uzyskano wprowadzając ciśnienia na konturze wyrobiska.

Przyjęto następujące parametry modelu podstawowego: chodnik o wymiarach 5 m x 3 m położony na głębokości 400 m. Parametry fizyczne:  $\rho=2200 \text{ kg/m}^3$ ,  $E=15\text{GPa}$ ,  $\nu=0,3$ ,  $B=0,32 \cdot 10^{-23} \text{ Pa}^{-2}\text{s}^{-1}$ ,  $n=2,0$ ,  $m=1,0$ .

### 8.3.1. Temperatura i wilgotność

Wiadomo, że temperatura górotworu rośnie z głębokością. Zmiana temperatury powoduje zwiększenie podatności na pełzanie, przez co wpływ gradientu termicznego można odwzorować w modelu uzmiennieniem wartości parametru  $B$  w prawie Nortona (6.5).

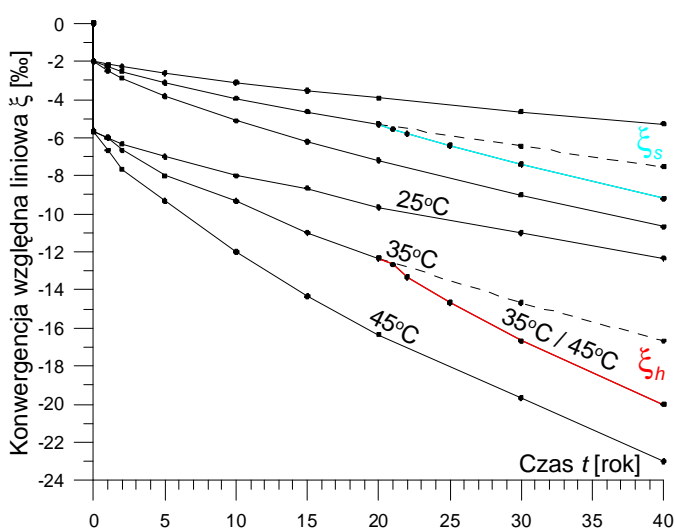
Współczynnik  $B$  o wartości  $0,32 \cdot 10^{-23}$  (zastosowany do warunków w kopalni w Sieroszowicach) odnosi się do temperatury  $T=(273+35)$  K i parametru  $Q/R=5025$  K. Przy takich wartościach współczynnik równania Arrheniusa (5.5)  $A=3,896 \cdot 10^{-17} \text{ Pa}^{-n} \cdot \text{s}^{-1}$ . Z tego równania wyliczyć można wartość współczynnika  $B$  dla temperatury  $25^\circ\text{C}$  i  $45^\circ\text{C}$ . Stąd:

$$B_{25} = 3,896 \cdot 10^{-17} \exp(-5025/298) = 0,18 \cdot 10^{-23} \text{ Pa}^{-2} \cdot \text{s}^{-1},$$

$$B_{35} = 3,896 \cdot 10^{-17} \exp(-5025/308) = 0,32 \cdot 10^{-23} \text{ Pa}^{-2} \cdot \text{s}^{-1},$$

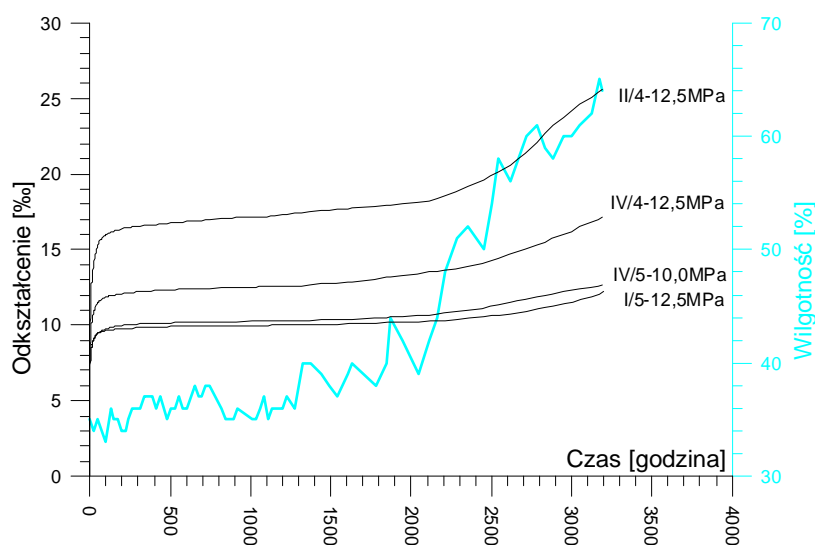
$$B_{45} = 3,896 \cdot 10^{-17} \exp(-5025/318) = 0,53 \cdot 10^{-23} \text{ Pa}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Na rys. 8.12 pokazano zależność konwergencji względnej pionowej i poziomej od czasu w górotworze o temperaturze  $25^\circ\text{C}$ ,  $35^\circ\text{C}$  i  $45^\circ\text{C}$  oraz, co bardziej istotne, znaczącą zmianę prędkości konwergencji przy zmianie temperatury górotworu w trakcie zaciskania wyrobiska. Różnice temperatur mogą wynikać z różnic głębokości: głębokości 600 m odpowiada temperatura  $25^\circ\text{C}$ , 900m –  $35^\circ\text{C}$  a 1200 m –  $45^\circ\text{C}$ , przy gradiencie termicznym  $30 \text{ m} / 1^\circ\text{C}$ . Czerwona i niebieska krzywa przedstawiają konwergencję chodnika na głębokości 900 m, w którym temperatura górotworu wzrosła o  $10^\circ\text{C}$  w 20. roku zaciskania wyrobiska. Taki efekt powstaje poprzez ogrzanie się górotworu, np. w wyniku lokowania odpadów radioaktywnych.



Rys. 8.12. Pełzanie w temperaturze  $25^\circ\text{C}$ ,  $35^\circ\text{C}$  i  $45^\circ\text{C}$  oraz pełzanie początkowo w temperaturze  $35^\circ\text{C}$  a następnie  $45^\circ\text{C}$

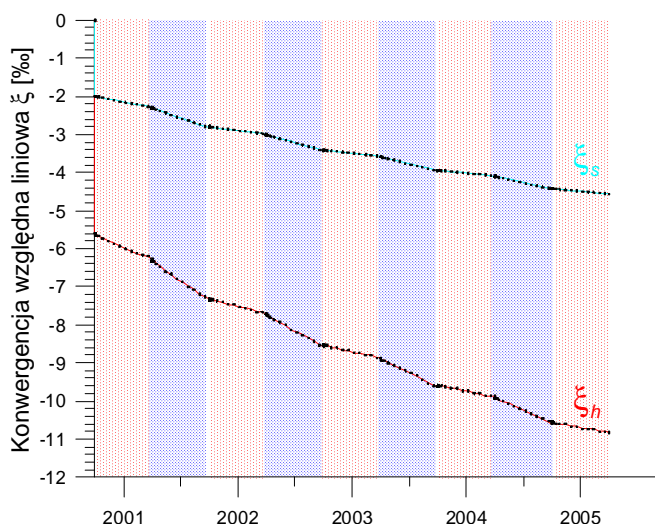
W okresie wiosenno-letnim w kopalniach obserwowana jest większa prędkość przemieszczeń, a w zimie mniejsza. Zwiększona częstotliwość pomiarów i dokładność dostosowana do otrzymywanych wyników, pozwala prześledzić sezonowe fluktuacje przemieszczeń w warunkach kopalnianych, np. w komorze Ważyn w Bochni [Kortas 2004]. Badania wpływu wilgotności na zachowanie próbek soli w laboratorium prowadzone były m.in. przez OBR Chemkop. Na rys. 8.13 pokazano wyniki pełzania jednoosiowego z rejestracją wilgotności. Przy zwiększonej wilgotności prędkość odkształcania próbek soli rosła.



Rys. 8.13. Pełzanie jednoosiowe w ciągu 4,5 miesiąca

Wpływ wilgotności symulować można w modelu konwergencji poprzez uwzględnienie oznaczeń laboratoryjnych w określeniu wartości podatności na pełzanie. Na rys. 8.14 pokazano wyniki obliczeń konwergencji poziomej i pionowej przy uwzględnieniu okresowych zmian wartości parametru  $B$ . W polach czerwonych stosowano wartość  $B_1$  a w polach niebieskich wartość  $B_2$ , przy czym  $B_2 > B_1$ .

Na rysunku 8.14 nakładają się na siebie wpływy czasu i okresowych zmian podatności na pełzanie. Podobne zachowanie górotworu stwierdzono wynikami pomiarów obniżen stropu w komorach kopalni Wieliczka [Kortas 2004].



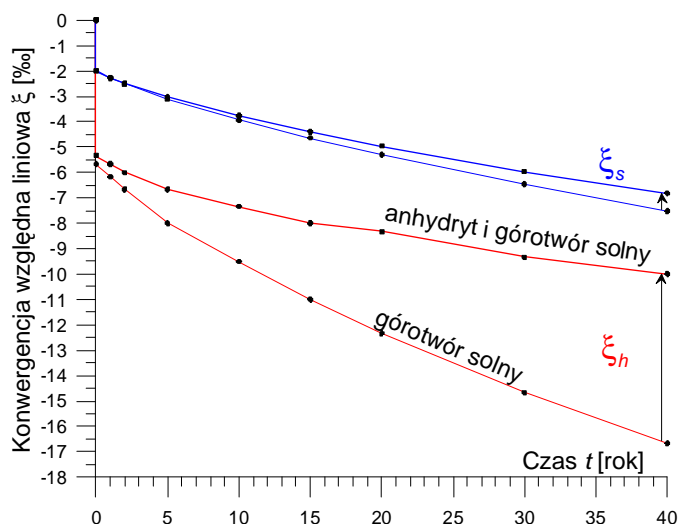
Rys. 8.14. Wpływ zmienności wilgotności w powietrzu kopalnianym (wg pór roku) na konwergencję

### 8.3.2. Uwarstwienie górotworu

Na ogół górotwór jest niejednorodny, w szczególności w złożach pokładowych. Wpływ zmienności litologicznej zaznacza się wyraźnie, gdy poszczególne warstwy górotworu różnią się znacznie podatnością na pęcznienie, np. pokład solny otoczony warstwami anhydrytu, dolomitu czy piaskowca.

Na rys. 8.15 porównano konwergencję wyrobiska w jednorodnym górotworze solnym i w górotworze zbudowanym z trzech warstw poziomych, z których środkowa miała grubość 9 m (półki stropowa i spągowa miały grubość równą wysokości wyrobiska – 3 m). W obliczeniach zróżnicowano wartości parametrów  $B$  i  $m$ . Dla warstwy środkowej przyjęto:  $B = 0,32 \cdot 10^{-23} \text{ Pa}^{-2} \text{ s}^{-0,82}$ ,  $m = 0,82$ , a dla warstw zewnętrznych:  $B = 0,32 \cdot 10^{-26} \text{ Pa}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,  $m = 1,0$ . Strzałkami zaznaczono wpływ takiego zróżnicowania właściwości górotworu na konwergencję.

Konwergencja pozioma w fazie pęcznienia zmniejszyła się o 16%, a pionowa o 57%. Wynika stąd, że obecność poziomych warstw znacząco wpływa na zmniejszenie konwergencji pionowej. Znacznie mniejszy efekt obecności warstw widoczny jest na konwergencji poziomej. W przedstawionych w rozdz. 7.2 wynikach obliczeń dla Sieroszowic także stwierdzono spadek konwergencji pionowej, wskazując tam na obecność w stropie warstwy anhydrytu o nieznanym położeniu i grubości warstwy.

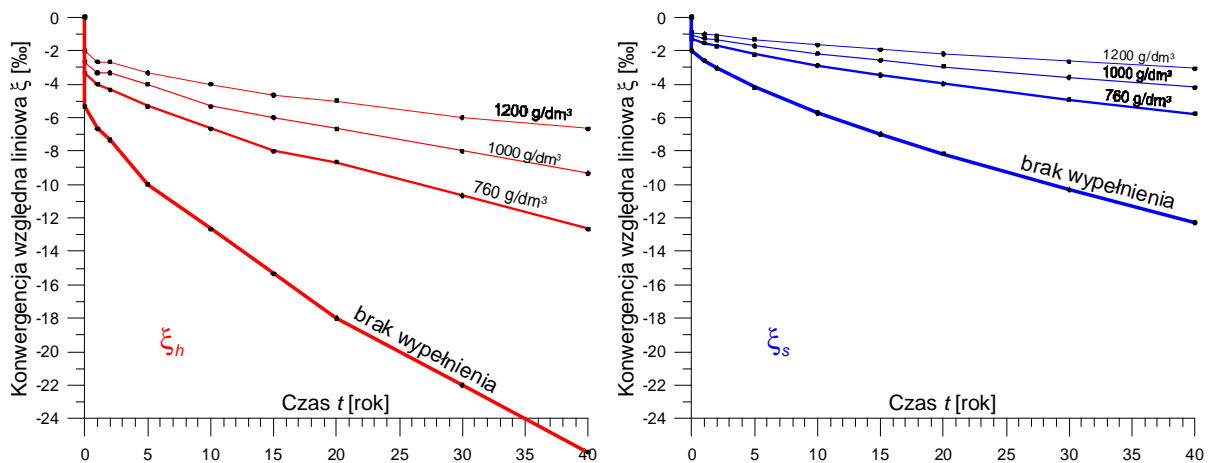


Rys. 8.15. Wpływ obecności pokładu anhydrytu nad i pod pokładem solnym

### 8.3.3. Wypełnienie wyrobiska

Wyrobiska solne mogą być wypełnione solanką o różnym stężeniu czy substancjami w nich magazynowanymi. Wypełnienie pustki odwzorowano w modelu poprzez przyłożenie na konturze wyrobiska ciśnień wynikających z gęstości cieczy i głębokości wyrobiska, zakładając połączenie hydrauliczne z powierzchnią. Wtedy ciśnienie w wyrobisku na głębokości  $H$  jest równe  $p = -H\rho g$ , gdzie  $\rho$  jest gęstością, a  $g$  przyspieszeniem ziemskim. Gęstości dobrano, zakładając wypełnienie wyrobiska pełnonasyconą solanką ( $1200 \text{ kg/m}^3$ ), wodą ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ) i benzyną ( $760 \text{ kg/m}^3$ ). Obliczone dla takich przypadków konwergencje porównano z konwergencją niewypełnionego wyrobiska (rys. 8.16).

Wypełnienie wyrobiska cieczami powoduje zmniejszenie konwergencji proporcjonalnie do jich gęstości. Na przykład wypełnienie wodą zmniejsza trzykrotnie konwergencję pionową i poziomą a wypełnienie pełnonasyconą solanką – czterokrotnie. Należy zaznaczyć, że jest to skutek ciśnienia wywołanego słupem cieczy. Wypełnienie wyrobiska tylko do stropu, czyli wyeliminowanie słupa cieczy, nie zmniejsza znacząco konwergencji dla wyrobisk o małej wysokości.



Rys. 8.16. Wpływ gęstości medium wypełniającego wyrobisko na konwergencje liniowe

Wpływ innych czynników geologiczno-górnich, takich jak np. nieprostokątny kształt przekroju chodnika, nieliniowy przebieg chodnika i jego nachylenie, przybierki spągu i ociosów, utrata ciągłości w wyniku przekroczenia wytrzymałości może być także uwzględniana w modelu konwergencji poprzez odpowiednią zmianę modelu geometrycznego w dwu lub w trójwymiarowej przestrzeni czy zmiany geometrii wyrobiska w odpowiednim czasie, wynikającym z przekroczenia wytrzymałościowych warunków granicznych.

## 8.4. Podsumowanie

W rozdziale 8 wyłoniono szereg czynników geometrycznych i fizycznych, które można uwzględnić w symulacjach komputerowych zaciskania wyrobiska poprzez rozbudowanie modelu konwergencji. Przedstawiono także czynniki niemożliwe do ujęcia w modelu. Należą do nich niedostateczne rozpoznanie górotworu i nieprawidłowości w uzyskiwaniu danych pomiarowych.

Dzięki rozbudowie modelu w przestrzeni 3D pokazano wpływ na konwergencję drażenia wyrobiska oraz obecności sąsiadujących wyrobisk. Przedstawiono także kilka przykładów ujęcia w modelu konwergencji wybranych czynników geologiczno-górnich, takich jak, temperatura, wilgotność, wypełnienie wyrobiska, uwarstwienie górotworu.

## 9. Zalecenia dotyczące projektowania pomiarów konwergencji i analizy ich wyników

Projektowanie kompleksowych pomiarów konwergencji powinno być poprzedzone analizą zjawisk zachodzących w badanym górotworze solnym. Podstawą prac powinien być projekt. Przede wszystkim trzeba określić cel podejmowanych obserwacji i uzasadnić proponowane w projekcie rozwiązania techniczne, czyli wybór miejsc stabilizacji znaków pomiarowych, sposób pomiaru oraz zakładaną dokładność i częstotliwość pomiarów. Poniżej sformułowano kilka uwag wynikających z przeprowadzonych w tej pracy studiów.

Geodezyjne pomiary konwergencji prowadzone w podziemnych kopalniach soli służyć powinny:

- określeniu stopnia zaciskania wyrobisk, w szczególności przeznaczonych na magazyny i składowiska odpadów,
- określeniu właściwości geomechanicznych górotworu,
- pośrednio obserwacji zagrożenia deformacjami nieciągłymi,
- pośrednio formułowaniu założeń geomechanicznych do projektowania wyrobisk.

Prowadzenie pomiarów konwergencji powinno być dostosowane do tych potrzeb. Wynika z tego kilka zaleceń:

- jeżeli poszukiwane są właściwości górotworu, stacje powinny być zakładane w odosobnionych wyrobiskach, w górotworze niezakłóconym wpływem eksploatacji,
- stacje powinny być zakładane na różnych głębokościach i w różnych warunkach geologicznych, w celu uchwycenia wpływu głębokości i tych warunków na ruch lokalny,
- punkty poszczególnych baz w ramach jednej stacji pomiarowej powinny być stabilizowane w kilku odległościach od konturu wyrobiska, głównie w kierunku poziomym,
- częstotliwość pomiarów powinna być dostosowana do zmieniającej się prędkości zaciskania i dokładności wykonywania pomiaru.

Jeżeli pomiary konwergencji służyć mają np. określeniu właściwości górotworu, zagrożeń deformacjami nieciągłymi, bezpieczeństwa w otoczeniu wyrobisk, projekt pomiarów i sposób jego realizacji powinien być skonsultowany ze specjalistą, który przeprowadzać będzie interpretację wyników tych pomiarów.

Operat z pomiaru konwergencji powinien zawierać krótki opis sposobu i warunków przeprowadzenia pomiaru oraz jego wyniki w formie tabelarycznej z oszacowaniem uzyskanej dokładności pomiaru. Bardzo istotne jest także przedstawienie obrysu wyrobisk z lokalizacją stacji pomiarowych, jak również danych o sytuacji górniczej i robotach prowadzonych w sąsiedztwie obserwowanego wyrobiska. Dołączyć należy również wykaz uszkodzonych znaków i niedostępnych do pomiaru baz.

Obserwatorzy wykonujący pomiar powinni zwrócić uwagę na zmiany konwergencji, przez porównanie z wartościami uzyskanymi z poprzedniego pomiaru. Jeśli wynik pomiaru różni się znacząco, należy sprawdzić np. czy znaki nie zostały uszkodzone lub czy istotnie nie zmieniły się warunki górnicze (odspojenia, zawodnienie, zmiana wentylacji itd).

Zaleca się, aby interpretacja wyników pomiarów konwergencji obejmowała:

- 1) analizę warunków górniczych i ewentualnie wyniki innych badań, np. laboratoryjnych czy geotechnicznych,
- 2) wskazanie na udział w wynikach obserwacji istotnych czynników geometrycznych i fizycznych omawianych w rozdz. 8.1,
- 3) przedstawienie wyników pomiarów konwergencji z obliczeniem – na podstawie pomiarów – wskaźników konwergencji i przedstawienie ich na wykresach np.  $\xi_h(t)$ ,  $\xi_s(t)$ ,  $\xi_p(t)$ ,  $\xi_v(t)$ ,
- 4) przeprowadzenie obliczeń z wykorzystaniem modelu konwergencji,
- 5) ocenę zgodności wyników pomiarów z modelem oraz ewentualną korektę modelu,
- 6) wnioski odnoszące się do celu podjętych obserwacji, a także częstotliwości dalszych obserwacji i niezbędnych uzupełnień stacji pomiarowych.

Taka interpretacja wyników pomiarów konwergencji powinna być przeprowadzana okresowo, po kilku seriach pomiarów.

## 10. Podsumowanie i wnioski

Mierzona w kopalniach soli konwergencja służyć miała uchwyceniu powiązania zaciskania wyrobisk ze zróżnicowanymi warunkami geologiczno-górnictwami, rozpoznaniu zjawiska zaciskania w ramach jednego wyrobiska, oszacowaniu obciążenia filarów, określeniu właściwości geomechanicznych górotworu a także rozpoznaniu wpływu głębokości na zaciskanie. Jednak w świetle przedstawionych w publikacjach i opracowaniach analiz i interpretacji trudno uznać, że spełnia tę rolę. Interpretacje wyników konwergencji mają charakter objawowy i nie wyłaniają faktycznego wpływu warunków geologiczno-górnictwami na zaciskanie wyrobiska. Aby konwergencja służyła założonym celom, wyniki pomiaru powinny być przetworzone z zastosowaniem odpowiedniego modelu geomechanicznego.

Analiza konwergencji w wyrobiskach komorowych czy konwergencji i przemieszczeń w strukturach wielopoziomowych jest bardzo złożona. W modelach geomechanicznych wymaga uwzględnienia rozkładu wyrobisk w przestrzeni 3D, a także rozłożonego w czasie ich powstawania. Z tych względów poszukiwanie właściwości górotworu powinno się opierać na analizie konwergencji w chodnikach. Wyniki takich analiz mogą być później wykorzystywane w modelach uwzględniających bardziej złożoną sytuację górnictwami.

Konwergencja chodnikowa mierzona na poszerzonych stacjach stanowi najbardziej wartościowy sposób rozpoznania właściwości górotworu. W tym celu były założone stacje pomiarowe w Kłodawie, w Siedlcu i Sieroszowicach. Niewłaściwy dobór lokalizacji chodnikowych stacji pomiarowych w Kłodawie – w pobliżu pola eksploatacyjnego – i krótkotrwały okres obserwacji w Siedlcu uniemożliwia geomechaniczną interpretację uzyskanych w pomiarach wyników. Walory prawidłowo wykonanych pomiarów spełnia praktycznie tylko stacja w Sieroszowicach. Jak wykazano w pracy wyniki tych pomiarów mogą stanowić podstawę do oszacowania właściwości lepkich górotworu przy wykorzystaniu ośrodka sprężysto-lepkiego w modelu konwergencji.

Stacje pomiarowe w kłodawskich chodnikach nie spełniły też roli w określeniu zmienności konwergencji z głębokością ze względu na wpływy sąsiednich wyrobisk komorowych. Sposobem na to mogłyby być obserwacje konwergencji przy pomocy prostych stacji założonych na różnych głębokościach kopalni, ale pod warunkiem, że wpływ sąsiedztwa wyrobisk na wynik pomiarów nie będzie znaczący.

Przedstawiony w pracy model konwergencji oparty na teorii ośrodka sprężysto-lepkiego pozwala na powiązanie wyników pomiarów z parametrami fizycznymi górotworu solnego.

Model ten stanowi wyjście do poszukiwania wpływu na konwergencje innych czynników geologiczno-górnicznych, jak na przykład sąsiedztwa wyrobisk czy zawilgoceń.

Współczesny stan wiedzy o zachowaniu się górotworu, znane i stosowane modele geomechaniczne, metody obliczeń numerycznych, wskazane w pracy zależności między podstawowymi wielkościami geometrycznymi i geomechanicznymi stanowią mogą podstawę do przeprowadzenia analiz odwrotnych. Dotyczy to doboru parametrów reologicznych prawa konstytutywnego, w szczególności przez porównanie wyników obliczeń z obserwowaną zależnością konwergencji od czasu. W takim ujęciu pomiary konwergencji wykonywane przez służby kopalniane stanowią mogą ważny element rozpoznania zachowania się górotworu, a pośrednio oceny jego bezpieczeństwa.

W praktyce pomiary konwergencji rozpoczynane są po upływie zbyt długiego czasu od utworzenia wyrobiska. Z tego względu nie jest możliwe wyłonienie pierwszej, najbardziej intensywnej fazy konwergencji. Pomiary powinny być skierowane na tę fazę zaciskania, szczególnie wtedy, gdy wyrobiska są na dużej głębokości oraz przeznaczone będą na magazynowanie lub składowanie odpadów.

Zawarta w pracy klasyfikacja metod pomiarów konwergencji i przyrządów pomiarowych z wyłonieniem sposobów bezpośrednich i pośrednich pomiaru konwergencji, a także przedstawiony sposób określania dokładności pomiaru służyć może ustaleniu odpowiedniej metody obserwacji i optymalnej częstotliwości pomiaru.

Mając na uwadze przyszłe wykorzystanie wyrobisk kopalń soli jako obiektów turystycznych, składowisk odpadów i podziemnych magazynów, a także pozyskiwania surowca, posługiwanie się modelowaniem geomechanicznym z wykorzystaniem do obliczeń programów metody elementów skończonych powinno być warunkiem poprawnej interpretacji wyników obserwacji.

Tezy pracy, tj.:

- 1 Prawa fizyczne opisujące ośrodek sprężysto-lepki z potęgowym prawem pełzania Nortona służyć mogą do opisu konwergencji w kopalniach soli
- 2 Model konwergencji, sformułowany w tej pracy, ujawnia istotne zależności charakteryzujące zaciskanie wyrobisk i sposób ich wyznaczania na drodze pomiarów
- 3 Wyniki pomiarów konwergencji z wykorzystaniem modelu konwergencji prowadzą do określenia reologicznych właściwości górotworu solnego zostały udowodnione.

Konstruując model opisany w rozdz. 6 przedstawiono jego własności i zastosowania do analizy wyników w Sieroszowicach. Umożliwiło to wykorzystanie metod numerycznych obliczeń z zastosowaniem modułu *nonlinear* programu Cosmos/M.

Wyprowadzono na drodze badań modelowych związki między smukłością wyrobiska a konwergencjami liniowymi i powierzchniową, związki konwergencji z czasem i głębokością przy uwzględnieniu różnych parametrów modelu. Zależności te mogą być podstawą do sformułowania programu obserwacji, których celem powinno być wyznaczenie właściwości górotworu o oparciu o pomiary in-situ.

Model konwergencji pozwala wyodrębnić wpływ poszczególnych czynników geologiczno-górnich na konwergencję. Możliwe stało się opisanie zaciskania wyrobiska ze wskazaniem wpływu poszczególnych czynników, jak i ich współuczestniczenia w obserwowanym zachowaniu górotworu. Model ten jednak nie odwzorowuje w pełni złożoności górotworu, dlatego powinien być w przyszłości udoskonalany.

Praca i jej wnioski oraz zalecenia projektowe i interpretacyjne mogą być wykorzystane w prowadzonych obecnie pomiarach, a w przyszłości do określenia zaciskania komór i ich zespołów, pól górniczych czy kopalni oraz powiązania go z osiadaniem, wykorzystując do tego fizyczne modele górotworu solnego.

## Bibliografia

1. Amadei B., Stephansson O. – 1997 – *Rock stress and its measurement*, Chapman & Hall, Londyn-Weinheim-Nowy Jork-Tokio-Melbourne-Madas
2. *Analiza geomechaniczna deformacji póltek międzykomorowych w polu nr 2 w nawiązaniu do aktualnych pomiarów przemieszczeń górotworu*, (Walaszczyk J. i in.), Kraków, 1997
3. *Analiza ruchu górotworu i sposób pomiaru przemieszczeń pionowych w kopalni Kłodawa*, ZBP GeoConsulting, Kraków, czerwiec 2000
4. *Analiza wraz z opracowaniem wyników pomiarów deformacji w wybranych wyrobiskach komorowych, chodnikowych oraz filarach międzykomorowych w KS „Kłodawa” – za rok 2002*, OBRGSCHEM. CHEMKOP, Kraków, styczeń 2002
5. *Analiza wraz z opracowaniem wyników pomiarów deformacji w wybranych wyrobiskach komorowych, chodnikowych oraz filarach międzykomorowych w KS „Kłodawa” – za rok 2003*, OBRGSCHEM. CHEMKOP, Kraków, grudzień 2003
6. *Analiza wraz z opracowaniem wyników pomiarów deformacji w wybranych wyrobiskach komorowych, chodnikowych oraz filarach międzykomorowych w KS „Kłodawa” – za rok 2005*, OBRGSCHEM. CHEMKOP, Kraków, grudzień 2005
7. *Analiza wyników pomiarów deformacji wraz z opracowaniem wyników dla wybranych wyrobiskach komorowych, chodników oraz filarów międzykomorowych w Kopalni Soli „Kłodawa” S.A. (za 2004 r.)*, OBRGSCHEM. CHEMKOP, Kraków, grudzień 2004
8. Baar C. A. – 1977 – *Applied Salt-Rock Mechanics 1. The in-situ behavior of salt rocks*, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Oxford, New York, 1977
9. *Badania procesów reologicznych w górotworze solnym wywołanych użytkowaniem podziemnych magazynów gazu*, Projekt badawczy KBN nr 5 T12A 017 22 (kier. Flisak D.), Kraków 2005 (maszynopis)
10. Bailey, R. W.: Trans. World Power Conf., Tokyo, 1929, page 1089
11. Bieniasz J., Ciągło W., Wojnar W. – 2003a – *Nowa metoda pomiarów deformacji solnej struktury folarowo-komorowej wykorzystująca dalmierz laserowy*, Półrocznik AGH Geodezja, T. 9, z. 2/1
12. Bieniasz J., Wojnar W. – 2007 – *Zarys historii pomiarów i wybrane wyniki obserwacji zjawiska konwergencji wyrobisk w pokładowych złożach soli*, Gospodarka Surowcami Mineralnymi, T. 23, z.spec., s. 133-142
13. Bieniasz J., Wojnar W. – 2008 – *Analiza porównawcza deformacji poeksploatacyjnych kłodawskiego systemu komorowo-filarowego przy pionowym i ukośnym układzie wyrobisk*, Gospodarka Surowcami Mineralnymi, T. 24, z. 3/2
14. Bieniasz J., Wojnar W., Misiak G. – 2003b – *Deformacje układu filarowo-komorowego w perspektywie dalszej bezpiecznej działalności kopalni soli „Kłodawa”*, Technika poszukiwań geologicznych. Geosynoptyka i geotermia, Rok XLII, z. 223

15. *Bieżąca analiza wielkości zaciskania wyrobisk chodnikowych w pokładzie soli na podstawie pomiarów konwergencji wykonanych na stacjach pomiarowych: I, II, III w Zakładach Górniczych „Sieroszowice”*, Wojnar W., Bieniasz J., praca niepublikowana OBR Chemkop dla KGHM OG Polkowice–Sieroszowice, Kraków 1995
16. Cacoń S. – 2001 – *Problemy wiarygodności geodezyjnych pomiarów deformacji obiektów inżynierskich w naruszonym górotworze*, Prace Naukowe IGIH Polit. Wroc. Nr 73, Konferencje Nr 40
17. Cała M., Flisiak D., Flisiak J., Rybicki S. – 2004a – *Zagrożenia wynikające z procesów reologicznych w wysadzie solnym Dębiny w świetle modelowania numerycznego*, [w:] *Problematyka zagrożeń naturalnych w górnictwie węgla brunatnego. Sympozja i konferencje Nr 62*, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków
18. Cała M., Flisiak J., Rybicki S. – 2004b – *Modelowanie oddziaływania odkrywkówek eksploatacji w kopalni „Bełchatów” na wysad solny Dębiny*, [w:] *Geotechnika i Budownictwo Specjalne*, Wyd. KGBiG AGH, Kraków
19. *Centralna Baza Danych Geologicznych* udostępniona przez Państwowy Instytut Geologiczny na <http://baza.pgi.waw.pl/>
20. *Charakterystyka własności deformacyjno-naprężeniowych złoża soli ZG Sieroszowice w miejscu lokalizacji komory badawczej* (Kier. H.Filcek). KGBiG AGH, Kraków 1994 (maszynopis)
21. Cieślik J., Flisiak D., Flisiak J., Mazurek J. – 2008 – *Przestrzenna analiza numeryczna wyężenia filarów komór solnych pola eksploatacyjnego Pagory w Otworowej Kopalni Soli „Barycz”*, *Górnictwo i geoinżynieria*, Rok 32, z. 1
22. Cieślik J., Pietruszka K. – 2008 – *Analiza zachowania górotworu i powierzchni terenu w rejonie komory E 140 pola OKS „Łęzkowice” w trakcie likwidacji pustek poeksploatacyjnych z wykorzystaniem MES i pomiarów geodezyjnych*, *Gospodarka Surowcami mineralnymi*, t. 24, z. 2/3 s. 359-369
23. Colin P., You T. – 1990 – *Salt geomechanics seen through 20 years experience at the Manosque Facility*. Int. Congr. SMRI, Paryż (materiały konferencyjne wydane w formie książkowej, niepublikowane)
24. Cristescu N.D., Hunsche U. – 1998 – *Time effects in rock mechanics*, Wiley&Sons. Chichester-Toronto
25. De Souza E., Mottahed P., Coode A., Sellers B. – 1997 – *Ten Years of Continuous Monitoring in a Mining Panel*, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. Vol. 34, No. 3-4
26. Dreyer W. – 1972 – *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
27. Dziunikowski J. L. – 1966 – *Stan naprężenia i odkształcenia oraz stopień wykorzystania złoża solnego przy eksploatacji pionowymi komorami cylindrycznymi*, *Zeszyty Naukowe AGH nr 153, Rozprawy Zeszy 75 75*, Kraków
28. Fernandez G. – 1994 – *Rock Mechanics for Underground Storage*, Proc. of Sol. Min. Research Inst. Conf. Hannover
29. Flisiak D., Flisiak J., Tajduś A. – 1997 – *Geomechaniczne problemy projektowania podziemnych magazynów sprężonego powietrza dla energetyki*, Biblioteka Szkoły Eksploatacji podziemnej Nr 6, Kraków

30. Flisiak D., Kłeczek Z. – 1994 – *Geomechanical research of the rock salt in aspect of its utilisation for building underground storages*, Rozprawy i monografie nr 19, Wydawnictwa AGH, Kraków
31. Griggs D. – 1939 – Creep of rocks, *Journal of Geology* 47, 3, s.225-251
32. Hejmanowski R. – 2004 – *Czasoprzestrzenny opis deformacji górotworu wywołanych filarowo-komorową eksploatacją złoża pokładowego*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Rozprawy-Monografie Nr 131, Kraków
33. Hoff N. J. – 1954 – *Buckling and stability*, 41<sup>st</sup> Wilbur Wright Memorial Lecture, *J. Roy. Aero. Soc.* 58, 1
34. Hoff N. J. – 1956 – *Creep buckling*, *Aero. Quart.* 7, 1
35. Hunsche U. – 1991 – True Triaxial Failure Tests on Cubic Rock Salt Samples – Experimental Methods and Results. Proceedings of the IUTAM-Symposium, Springer, Berlin
36. Hunsche U. – 1993 – Uniaxial and Triaxial Creep and Failure Tests on Rock: Experimental Technique and Interpretation, [w:] *Time-dependent Behaviour of Geomaterials*, Udane, October 11-15
37. Jeremic M. L. – 1994 – *Rock Mechanics in Salt Mining*, AA Balkema, Rotterdam, Brookfield, 1994
38. Kłeczek Z., Flisiak D. – 1994 – *Geomechanical Research of the Rock Salt in Aspect of Its Utilisations for Building Underground Storage*, Rozprawy Monografie nr 19, Wyd. AGH, Kraków
39. *Komora Ważyn. Pomiar konwergencji od maja 1993 do listopada 2002*, archiwum KS Bochnia
40. Konderla P., Kasprzak T. – 1997 – *Metody komputerowe w teorii sprężystości. Część I. Metoda elementów skończonych*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław
41. Kortas G. – 1979 – *Ruch górotworu przed wdarciem wód do wyrobisk kopalni soli w Wapnie*, *Ochrona Terenów Górniczych*, nr 49
42. Kortas G. – 1984 – *Zachowanie filarów i półek w kopalni soli „Kłodawa”*, Sympozjum. Górnictwo surowców chemicznych – Zbiorniki podziemne – Środowisko naturalne, Wyd. Uczel. AGH, str. 231-242
43. Kortas G. – 2001 – *Konwergencja jako miara zacikania wyrobisk komorowych*, *Przegląd Górniczy* 6/2001
44. Kortas G. (red.) – 2004 – *Ruch górotworu i powierzchni w otoczeniu zabytkowych kopalń soli*, Wydawnictwo Inst. Gosp. Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków
45. Kortas G. – 2007 – *The influence of the form of a salt mine on the displacement of the ground surface*, *Archiwum Górnictwa*, vol. 52, iss.1, s. 107-120
46. Kortas G. (red.) – 2008 – *Ruch górotworu w rejonie wysadów solnych*, Wydawnictwo Inst. Gosp. Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków
47. Kortas G., Józefko L. – 2001 – *Konwergencja komory Ważyn w zabytkowej kopalni soli Bochnia*, *Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska*, 7-8 (83-84)

48. Kortas G., Maj A. – 2005 – *Evaluation of stresses around an underground reservoir of liquid fuels in unrecognised mining and geological conditions*, A.A.Balkema Publishers, Pocc.Int.Symp. ISRM Eurock, Brno 2005
49. *Kryteria wyteżenia górotworu solnego w aspekcie długotrwałej stateczności wyrobisk podziemnych*, (Kier. Z. Kłeczek). Prace statutowe Wyd. Górniczego AGH, Kraków, 1999 (maszynopis)
50. Kunstman A., Poborska-Młynarska K., Urbańczyk K. – 2002 – *Zarys otworowego ługownictwa solnego. Aktualne kierunki rozwoju*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków
51. Lux K. H., Düsterloh U., Hou Z. – 2001 – *Increasing the Profitability of Storage Cavities by Improvement of the Dimensioning Concept Including CDM*, SMRI Fall Conference, Albuquerque, USA
52. Lux K. H., Heusermann S. – 1983 – *Creep test on rock salt with changing load as a basis for the verification of theoretical material laws*, Sixth Symposium on Salt. Vols. 1-2. 1985 (May 24-28, 1983, Toronto, Ontario, Canada), Salt Institute Inc., Alexandria, Wirginia, s. 417-435
53. Maciaszek J. – 2008 – *Skanowanie laserowe jako nowa technologia inwentaryzacji i wizualizacji zabytkowych komór solnych*, Gospodarka Surowcami Mineralnymi, Tom 24, Zeszyt 3/2, Kraków 2008 (str. 197-210)
54. Maj A. – 2007a – *Określenie konwergencji i właściwości lepkich górotworu solnego na przykładzie obserwacji w ZG Polkowice–Sieroszowice*, Przegląd Górniczy, nr 6, 2007
55. Maj A. – 2007b – *Modelowanie konwergencji w oparciu o wyniki pomiarów geodezyjnych w kopalni Siedlec*, w: *Geotechnika w budownictwie i górnictwie*, Ofic. Wyd.Pol.Wroc., Wrocław 2007, s. 451–457
56. Maj A. – 2008a – *Wpływ parametrów ośrodka sprężysto–lepkiego na konwergencję powierzchniową prostokątnego chodnika na podstawie obliczeń numerycznych*, Górnictwo i geoinżynieria, Rok 32, Zeszyt 1
57. Maj A. – 2008b – *Zależność konwergencji wyrobiska górniczego od czasu w górotworze sprężysto-lepkim na podstawie badań modelowych*, Gospodarka Surowcami Mineralnymi, Tom 24, Zeszyt 3/2, s. 97-109
58. Maj A. – 2009 – *Naprężenia, odkształcenia i konwergencje na różnych głębokościach kopalni soli, studium modelowe dla chodnika w górotworze solnym*, Górnictwo i geoinżynieria, Rok 33, Zeszyt 1
59. Majcherczyk T., Małkowski P., Niedbalski Z. – 2006 – *Ruchy górotworu i reakcje obudowy w procesie niszczenia skał wokół wyrobisk korytarzowych na podstawie badań „in-situ”*, Wyd. AGH WGiG, Kraków
60. Matalucci R. V., Hunter O. – 1981 – *Geomechanical application for the Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) project*, [w:] *The Mechanical Behavior of Salt I*, Procc. Of First Conference, Pensylvania State University, November 9-11, 1981
61. Mazurkiewicz M., Piotrowski Z., Tajduś A. – 1997 – *Lokowanie odpadów w kopalniach podziemnych. Część II (Geoinżynieria)*, Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej Nr 5, Kraków
62. Mirza U. A. – 1981 – *Prediction of Creep Deformations in Rock Salt Pillars*, First Conference on the Mechanical Behavior of Salt, 1981, Trans Tech Publications

63. Mokrzycki E. (red.), Ślizowski K., Saługa P. – 1996 – *Surowce mineralne Polski. Surowce chemiczne. Sól kamienna*, Wydawnictwo Centrum PPGSMiE PAN, Kraków
64. Munson D. E. – 1997 – *Constitutive Model of Creep in Rock Salt Applied to Underground Room Closure*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics, Volume: 34, Issue: 2, February, 1997, pp. 233-247,
65. Munson D.E., Dawson P. R. – 1984 – *Salt Constitutive Modeling using Mechanism Maps*, Proc. 1st Conf. on the Mechanical Behavior of Salt, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany
66. Norton F. H. – 1929 – *The creep of steel at high temperatures*, McGraw-Hill, New York
67. *Ocena geomechaniczna komór eksploatacyjnych i magazynowych na złożu „Góra”*, OBRGSCHEM. Chemkop, Kraków, marzec 1999
68. *Ocena możliwości długotrwałej eksploatacji podziemnego magazynu ropy i paliw w kopalni „Góra”*, OBRGSCHEM. Chemkop, ZBP GeoConsulting, Kraków, sierpień 2003
69. *Ocena stanu bezpieczeństwa trasy sanatoryjno-turystycznej – poziom III Sienkiewicz, komora Wążyn w kopalni Bochnia w roku 2001*, ZBP GeoConsulting, Kraków, czerwiec 2001a
70. *Ocena stanu bezpieczeństwa trasy sanatoryjno-turystycznej – szyb „Sutoris” w kopalni Bochnia w roku 2001*, ZBP GeoConsulting, Kraków, sierpień 2001b
71. *Ocena stanu bezpieczeństwa trasy sanatoryjno-turystycznej na poziomie I August w kopalni Bochnia w roku 2001*, ZBP GeoConsulting, Kraków, maj 2001c
72. *Ocena stanu bezpieczeństwa trasy sanatoryjno-turystycznej w roku 2000*, ZBP GeoConsulting, Kraków, maj 2000
73. Ode H. – 1968 – *Review of Mechanical Properties of Salt Relating to Salt-Dome Genesis*, Salin Deposits, Geological Society of America, Special Paper 88, s. 543-593
74. *Określenie in situ konwergencji komory typu zbiornikowego w złożu soli. Badania na stanowisku doświadczalnym w komorze S-1 w kop. Solno*, OBRGSCHEM. CHEMKOP, Kraków, listopad 1980
75. *Opomiarowanie konwergencji wyrobisk rejonu komór cylindrycznych. Sprawozdanie z wykonania odczytów i bieżąca interpretacja wyników*, OBRGSCHEM. CHEMKOP, Kraków, styczeń 1987
76. Pielok J. – 2002 – *Badanie deformacji powierzchni terenu i górotworu wywołanych eksploatacją górniczą*, AGH WGGiIŚ, Kraków
77. *Podłużnia August, Kaplica Św. Kingi, Komora Stajni, Komora Zamorsko II (dawny skład MW). Dane geodezyjne do oceny stanu bezpieczeństwa trasy turystyczno-sanatoryjnej w roku 2001*, archiwum KS Bochnia
78. Potts E.L.J., Thompson T.W., Passaris E.K.S., Horseman S.T. – 1980 – *An investigation into underground gas storage in brine well cavities*, Fifth Symposium on Salt. Vols. 1-2. 1980 (May 29-June 1, 1979, Hamburg, Germany), Northern Ohio Geological Society
79. *Pomiary deformacji w wybranych wyrobisk komorowych, chodnikowych oraz filarów Kopalni Soli „Kłodawa”*. Opracowanie i analiza wyników pomiarów – za rok 1996, OBRGSCHEM. CHEMKOP, Kraków, grudzień 1996

80. *Projekt prac badawczych w K. S. Kłodawa w zakresie lokalnych pomiarów odkształceń i naprężeń*, OBRGSCHEM. Chemkop dla Kopalni Soli Kłodawa, Kraków, 1978, archiwum Chemkop/GK
81. Sałustowicz A. – 1965 – *Zarys mechaniki górotworu*, Wyd. Śląsk, Katowice
82. Sawin, Morgajewski – 1935 – *Raspriedielenije napriazanij wokrug podziemnych gornych wyrobotok*, Gornyj Żurnal
83. Sellers J. B. – 1970 – *Rock Mechanics Instrumentation for Salt Mining*, Third Symposium on Salt. Vols. 1-2. 1970 (April 22-24, 1969 Cleveland, OH), Northern Ohio Geological Society (nie ukazało się w druku, ogłoszone na [www.saltinstitute.org](http://www.saltinstitute.org))
84. Sobczyk J., Kortas G. – 2003 – *Określenie współczynników potęgowego prawa pełzania soli kamiennej na podstawie testów laboratoryjnych*, Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, T. 5, Nr 3-4, s. 421-432
85. *Sprawozdanie przejściowe z częściowych wyników badań konwergencji w komorach kopalni i PMRiP Góra*, OBRGSCHEM. CHEMKOP, Kraków, sierpień 2002
86. *Sprawozdanie z I etapu pracy pt.: „Aktualna ocena zjawisk geomechanicznych w Kopalni Soli Kłodawa na podstawie dotychczasowych pomiarów”*, IMG PAN dla KS Kłodawa, czerwiec 1988, archiwum IMG PAN/KSKłodawa/GK
87. *Sprawozdanie z pomiaru konwergencji w Kaplicy Błogostawionej Kingi w Kopalni Soli „Bochnia”*, ZBP GeoConsulting, Kraków, styczeń 1994 – marzec 1998
88. *Sprawozdanie z realizacji tematu pt.: Przeprowadzenie wstępnych pomiarów wartości ciśnienia szczelinowania mioceńskiego górotworu solnego złoża „Siedlec”, w aspekcie dopuszczalnej wartości ciśnienia magazynowania ropopochodnych oraz kontynuacja pomiarów konwergencji wyrobisk na założonych stacjach pomiarowych*, OBRGSCHEM. Chemkop, Kraków 1994
89. Szewczyk J. – 2008 – *Kopalnia Soli „Wieliczka” – 80 lat obserwacji deformacji pogórnich*, Gospodarka Surowcami Mineralnymi, Tom 24, Zeszyt 3/2 (s. 251-272)
90. Szpetkowski S. – 1978 – *Pomiary deformacji na terenach górniczych*, Wyd. Śląsk, Katowice
91. Ślizowski J. – 2006 – *Geomechaniczne podstawy projektowania komór magazynowych gazu ziemnego w złożach soli kamiennej*, Studia. Rozprawy. Monografie Nr 137, Wyd.IGSMiE PAN, Kraków
92. Ślizowski J., Urbańczyk K. – 2004 – *Influence of depth on rock salt effort around the single chamber*, Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków
93. *Świadectwo autorskie o dokonaniu wzoru użytkowego pt. Urządzenie do pomiaru konwergencji Nr 65344, Ochrona prawna nr 41744*, Twórcy: Charęża S., Blok K., Kortas G., Salawa M., Bieda B., 29.12.1986
94. Tajduś A. – 1990 – *Utrzymanie wyrobisk korytarzowych w świetle wpływu czasu na naprężenia, odkształcenia i strefy zniszczenia w górotworze*, Zeszyty Naukowe AGH. Górnictwo. Zeszyt 154, Wydawnictwo AGH, Kraków
95. Tajduś K. – 2007 – *Determination of mechanical parameters of strata under the influence of underground mining using „back analysis”*, 8. Geokinematischen Tag, Verlag Glückauf GmbH

96. Tajduś K. – 2008 – *Określanie wartości parametrów odkształceniowych górotworu uwarstwionego w rejonie wpływów eksploatacji górniczej*, Praca doktorska, Arch. WGiG AGH
97. Walaszczyk J. – 1989 – *Zastosowanie metod numerycznych w geomechanice*, Skrypty uczelniane Nr 1174, Wydawnictwo AGH, Kraków
98. Walaszczyk J., Barnat A., Hachaj S. – 1998 – *Komputerowa symulacja deformacji póltek międzykomorowych w filarowo-komorowym systemie eksploatacji soli kamiennej*, Geomechaniczne Problemy Eksploatacji Złóż i Budownictwa Specjalnego, Wydawnictwo KGGiG AGH, Kraków
99. *Wykonanie pomiarów konwergencji wyrobisk górniczych w strefie ochrony konserwatorskiej z opracowaniem i analizą wyników*, OBRGSCHEM. Chemkop dla Kopalni Soli Wieliczka, Kraków, grudzień 2005, archiwum KS Wieliczka
100. Zienkiewicz O. C. – 1972 – *Metoda elementów skończonych*, Arkady, Warszawa

Autorka korzystała również ze stron internetowych wykonawców przyrządów pomiarowych:

[www.budokop.pl](http://www.budokop.pl)

[www.chemkop.pl](http://www.chemkop.pl)

[www.geokon.pl](http://www.geokon.pl)

oraz podręczników obsługi programu Cosmos/M wydanych przez Structural Research and Analysis Copr.:

Basic System. Part 1

Basic System. Part 2

User's Guide

Getting Started

Command Reference

Nonlinear Module

# Dorobek naukowy i zawodowy

## Publikacje

- [1] Maj A., *Sprawozdanie z XIII Międzynarodowego Sympozjum Solnego „Quo Vadis Sal” w Dolinie Demianowskiej na Słowacji (2-3 października 2008)*, Geologia 2009, Tom 35, Zeszyt 3, Wyd. AGH, Kraków 2009 (s.491-494; 213-214)
- [2] Maj A., *Naprężenia, odkształcenia i konwergencje na różnych głębokościach kopalń soli, studium modelowe dla chodnika w górotworze solnym*, Górnictwo i geoinżynieria, Rok 33, Zeszyt 1, Kraków 2009
- [3] Maj A., *Zależność konwergencji wyrobiska górniczego od czasu w górotworze sprężysto-lepkim na podstawie badań modelowych*, Gospodarka surowcami mineralnymi, Tom 24, Zeszyt 3/2, IGSMiE PAN, Kraków 2008 (s.97-109)
- [4] Fajkiewicz Z., Flisiak D., Kortas G., Kortas Ł., Maj A., Szybist A., Wilkosz P., *Podsumowanie pracy i wnioski (rozdz. 12.1)*, W: Ruch górotworu w rejonie wysadów solnych (red. Kortas), Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków 2008 (s.235-241)
- [5] Maj A., *Założenie i pomiar wysokości reperów nad nieeksploatowanymi wysadami solnymi (rozdz. 10)*, W: Ruch górotworu w rejonie wysadów solnych (red. Kortas), Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków 2008 (s.217-223)
- [6] Maj A., *Wpływ parametrów ośrodka sprężysto-lepkiego na konwergencję powierzchniową prostokątnego chodnika na podstawie obliczeń numerycznych*, Górnictwo i geoinżynieria, Rok 32, Zeszyt 1, Kraków 2008
- [7] Maj A., *Salt mine gallery convergence interpretation by means of finite elements method (FEM)*, XIII International Congress – International Society for Mine Surveying, Budapeszt, Węgry, 24-28.09.2007 (poz. 094) ISBN 978-963-9038-18-9
- [8] Maj A., *Określenie konwergencji i właściwości lepkich górotworu solnego na przykładzie obserwacji w ZG Polkowice–Sieroszowice*, Przegląd Górniczy, nr 6, 2007
- [9] Maj A., *Sprawozdanie z XI Sympozjum Solnego „Quo vadis sal” w Szklarskiej Porębie (9-10 listopada 2006)*, Gospodarka surowcami mineralnymi, Tom 23, Zeszyt specjalny 1, IGSMiE PAN, Kraków 2007 (s.213-214)
- [10] Kortas G., Maj A., *Zaciskanie wyrobisk w górotworze solnym - modelowanie i geomechaniczna interpretacja pomiarów*, Gospodarka surowcami mineralnymi, Tom 23, Zeszyt specjalny 1, IGSMiE PAN, Kraków 2007
- [11] Maj A., *Modelowanie konwergencji w oparciu o wyniki pomiarów geodezyjnych w kopalni Siedlec*, w: Geotechnika w budownictwie i górnictwie, Ofic.Wyd.Pol.Wroc., Wrocław 2007, s. 451–457
- [12] Kortas G., Maj A., *Modelowanie konwergencji w modularnej strukturze wielopoziomowej kopalni soli*, Prace IMG PAN; T 7, Nr 3-4; Kraków 2005

- [13] Kortas G., Maj A., *Evaluation of stresses around an underground reservoir of liquid fuels in unrecognised mining and geological conditions*, A.A.Balkema Publishers, Pocc.Int.Symp. ISRM Eurock, Brno 2005
- [14] Maj A., Kortas G., *Wyteżenie filarów przy komorowo-filarowej eksploatacji złoża anhydrytów*, Przegląd Górniczy, nr 11, 2004
- [15] Maj A., *Obserwacja osiadań powierzchni nad wyrobiskami w wysadzie solnym na przykładzie kopalni Kłodawa*, Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie, nr 9(121) 2004

## **Wystąpienia (sympozja, konferencje, seminaria)**

- [1] Florkowska L., Tajduś A., Maj A., *Wspomaganie projektowania otworu wiertniczego za pomocą modelowania numerycznego*, poster – Sympozjum Solne „Quo Vadis Sal” w Gdańsku – Jelitkowie, 8-9 października 2009, prezentacja: A. Maj
- [2] Florkowska L., Tajduś A., Maj A., *Wspomaganie projektowania otworu wiertniczego za pomocą modelowania numerycznego*, poster – Konferencja „Efektywność Energetyczna 2009” w Krakowie, 21-23 września 2009, prezentacja: A. Maj
- [3] Maj A., *Naprężenia, odkształcenia i konwergencje na różnych głębokościach kopalń soli, studium modelowe dla chodnika w górotworze solnym*, referat – ZSMGiG w Szklarskiej Porębie 8-13.03.2009, wygłaszała: A. Maj
- [4] Maj A., *Naprężenia, odkształcenia i konwergencje na różnych głębokościach kopalń soli, studium modelowe dla chodnika w górotworze solnym*, referat – Odbiory w IMG PAN 24-25.11.2008, wygłaszała: A. Maj
- [5] Kortas G., Maj A., *Ruch górotworu w rejonie wysadów solnych*, referat – sympozjum PSGS w Dolinie Demianowskiej na Słowacji 2-3.10.2008, wygłaszał: G. Kortas
- [6] Maj A., *Wpływ parametrów ośrodka sprężysto-lepkiego na konwergencję powierzchniową prostokątnego chodnika na podstawie obliczeń numerycznych*, referat – ZSMGiG w Krynicy 9-14.03.2008, wygłaszała: A. Maj
- [7] Maj A., *Charakterystyka konwergencji na podstawie badań modelowych*, seminarium IMG PAN 25.10.2007
- [8] Maj A., *Zależność konwergencji od czasu w ośrodku sprężysto-lepkim na podstawie badań modelowych*, referat – sympozjum PSGS w Kłodawie 11-12.10.2007, wygłaszała: A. Maj
- [9] Kortas G., Maj A., *Zaciskanie wyrobisk w górotworze solnym, modelowanie i geomechaniczna interpretacja pomiarów na przykładzie złoża soli Polkowice – Sieroszowice*, referat – sympozjum PSGS w Szklarskiej Porębie 9-10.11.2006, wygłaszali: G. Kortas i A. Maj
- [10] Maj A., *Specyficzność pomiarów deformacji górotworu i powierzchni w górnictwie solnym*, seminarium IMG PAN 25.05.2006

- [11] Kortas G., Maj A., *Modelowanie konwergencji w modularnej strukturze wielopoziomowej kopalni soli*, referat – Odbiory IMG PAN 24-25.11.2005, wygłaszała: A. Maj
- [12] Maj A., Kortas G., *Konwergencja w świetle pomiarów i symulacji komputerowych*, referat – Konferencja Naukowa IMG PAN w Bochni 20.02.2004, wygłaszała: A. Maj
- [13] Kortas G., Maj A., *Rozkład naprężeń w otoczeniu podziemnego magazynu paliw – model czasoprzestrzenny*, seminarium IMG PAN 25.09.2003, wygłaszał G. Kortas

## Udział w projektach badawczych

- [1] Projekt badawczy wspólny Naukowej Sieci Tematycznej pt.: *Nowe aplikacje w zakresie udostępniania i eksploatacji złóż węglowodorów otworami kierunkowymi i poziomymi* (2007 – 2009)  
 Florkowska L., Maj A., Nowakowski A., Tajduś K. – 2008 – *Modelowanie trajektorii otworu kierunkowego z uwzględnieniem budowy geologicznej i właściwości fizyko-mechanicznych skał (na przykładzie złoża gazu ziemnego Mirocin)*, praca naukowo-badawcza, Kraków, kwiecień 2008
- [2] Projekt badawczy własny nr 4 T12A 029 29 pt.: *Określenie ruchu górotworu w rejonie wysadów solnych* (2005 – 2008)  
 Maj A. – 2008 – *Założenie i pomiar wysokości reperów nad nieeksploatowanymi wysadami solnymi* (rozdz. 10), W: *Ruch górotworu w rejonie wysadów solnych* (red. Kortas), Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków 2008 (s.217-223)  
 Fajkiewicz Z., Flisiak D., Kortas G., Kortas Ł., Maj A., Szybist A., Wilkosz P. – 2008 – *Podsumowanie pracy i wnioski* (rozdz. 12.1), W: *Ruch górotworu w rejonie wysadów solnych* (red. Kortas), Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków 2008 (s.235-241)
- [3] Projekt badawczy własny nr 5 T12E 016 22 pt.: *Określenie rozkładu przemieszczeń w górotworze i na powierzchni dla potrzeb zabezpieczenia zabytkowych kopalń soli* (2002 – 2004)  
 Formułowanie modelu numerycznego i przeprowadzenie symulacji komputerowych
- [4] Projekt badawczy zamawiany przez WUG pt.: *Studium możliwości likwidacji zagrożenia wodnego dla zabytkowej Kopalni Soli „Wieliczka” za pomocą bariery drenażowej lub ekranu izolującego* (1994 – 1995)

## Wyprawy naukowe

1. Seminarium geologiczno-górnictwo w Rumunii (2009)
2. Seminarium geologiczno-górnictwo na kresach wschodnich (2008)

3. II wyprawa Polskiego Stowarzyszenia Górnictwa Solnego *Sycylia 2007*
4. I wyprawa Polskiego Stowarzyszenia Górnictwa Solnego *Morze Martwe 2006*

## **Ekspertyzy**

Udział w opracowaniu ok. 30 ekspertyz, opinii i in. dla Inowrocławskich Kopalń Soli SOLINO S.A., Kopalni Soli Kłodawa S.A., Kopalni Soli Wieliczka S.A., Kopalni Soli Bochnia P.P., Kopalni Gipsu i Anhydrytu „Nowy Łąd” Sp. z o.o., byłej Kopalni Soli w Wapnie i in.

## **Praca społeczna**

Od 2009 r. pełnienie funkcji Sekretarza Polskiego Stowarzyszenia Górnictwa Solnego  
Udział w organizacji corocznych konferencji Polskiego Stowarzyszenia Górnictwa Solnego „*Quo Vadis Sal*”