UKD 622.363.1: 622.2-045.43: 622.28

Wpływ wymiarów filarów międzykomorowych na ich nośność w świetle wybranych rozwiązań analitycznych

The influence of inter-chamber pillars dimensions on their capacity in the light of selected analytical solutions

Dr inż. Wacław Andrusikiewicz)*

Treść: W artykule zaprezentowano wybrane metody wymiarowania filarów międzykomorowych w podziemnych kopalniach soli prowadzących eksploatację systemem komorowym. Porównano przedstawione metody oraz wskazano na istotne różnice w uzyskiwanych wynikach. Dla zilustrowania omawianych metod wykonano przeliczenia szerokości filarów międzykomorowych na realnych przykładach zaczerpniętych z podziemnej kopalni soli oraz przedstawiono ich wyniki.

Abstract: This paper presents the selected methods for dimensioning inter-chamber pillars in underground salt mines which use the chamber system method for exploitation. The presented methods have been compared and some significant differences of the results obtained have been indicated. To illustrate the methods under research, some re-calculations of inter-chamber pillars width have been done on the actual examples taken from the underground salt mine. Finally, the results of those calculations have been presented.

Słowa kluczowe:

górnictwo solne, system komorowy, filary międzykomorowe

Key words:

salt mining, chamber system, inter-chamber pillars

1. Wprowadzenie

Górnictwo soli kamiennej w ciągu blisko tysiącletniej praktyki poprzez obserwacje i doświadczenia wypracowało bezpieczne wymiary elementów składających się na komorowy system eksploatacji. Do tych elementów zalicza się m. in. calizny międzywyrobiskowe (filary międzykomorowe, półki międzypoziomowe) oraz wyrobiska eksploatacyjne – komory. O tym, że wymiary poszczególnych elementów były dobierane prawidłowo może świadczyć historia kopalń soli kamiennej np. w Wieliczce i Bochni.

Rozwiązania wynikające z praktyki spełniały swoje zadanie, pozwalając na bezpieczną eksploatację soli kamiennej. Niemniej jednak w ostatnich kilkudziesięciu latach wielu badaczy podjęło trud weryfikacji przyjmowanych wymiarów m.in. w oparciu o badania wytrzymałościowe próbek soli kamiennej oraz wpływu kształtu i wielkości próbki na jej wytrzymałość. Na tej podstawie formułowano różne rozwiązania analityczne, z których część wykorzystywana jest nie tylko w górnictwie solnym, ale także przy eksploatacji innych kopalin (rudy metali nieżelaznych, anhydryt). Nadrzędnym celem wszystkich rozwiązań analitycznych jest zachowanie szeroko rozumianego bezpieczeństwa kopalni podziemnej, a przy okazji optymalizowanie gabarytów wyrobisk, filarów i półek w celu poprawienia wskaźnika wykorzystania złoża.

2. Rozwiązania analityczne

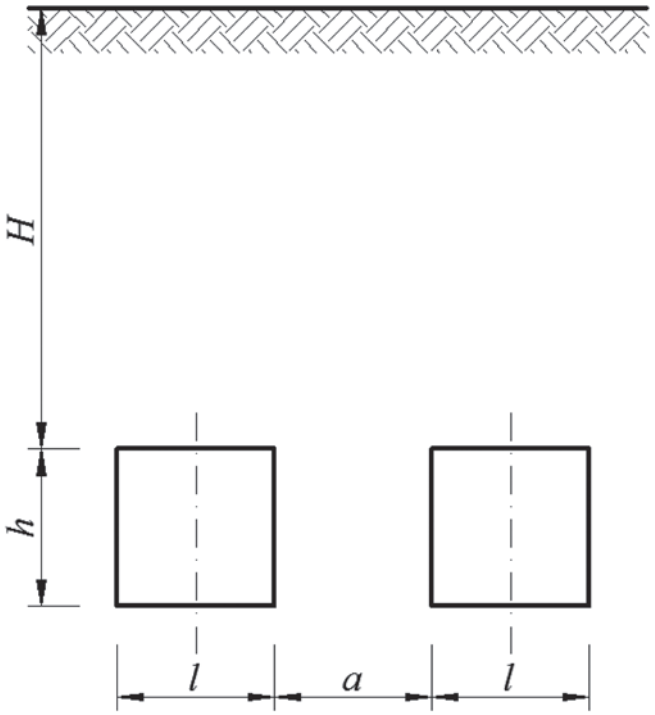
W artykule przedstawiono kilka najpopularniejszych rozwiązań, wskazując na różnice ilościowe pomiędzy poszczególnymi metodami oraz ich wpływ na ostateczne wymiary filarów i komór. Ograniczono się do omówienia problematyki wymiarowania filarów międzykomorowych z uwagi na to, że w przypadku dużych głębokości, na których odbywa się aktualnie eksploatacja soli kamiennej w Polsce, ciśnienie poziome górotworu równe jest ciśnieniu pionowemu i wymiarowanie półek międzypoziomowych odbywa się w sposób analogiczny jak filarów [2].

Zgodnie z hipotezą Turnera [3] filar międzykomorowy przenosi obciążenie od masy skał zalegających bezpośrednio nad filarem i przylegających do niego komór, przy czym nie uwzględnia się więzi pomiędzy rozpatrywanym nadkładem a pozostałym masywem. Przekrój poziomy filara międzykomorowego powinien być tak dobrany, aby zapewnić bezpieczne przeniesienie ciśnienia wywołanego przez skały nadległe. Wzajemny układ komór przyległych do filara międzykomorowego pokazano na rysunku (rys. 1).

Zakładając, że ciężar słupa skał nadległych działający na filar i przyległe do niego komory jest zrównoważony poprzez przyrost naprężeń pionowych panujących w filarze, to naprężenia te można przedstawić w następującej postaci:

$$\sigma_z = \gamma H \left(\frac{\frac{1}{2}+a+\frac{1}{2}}{a}\right) \qquad (1)$$

*) AGH w Krakowie



Rys. 1. Schemat układu komór przylegających do filara
Fig. 1. Schematic layout of chambers adjacent to the pillar
H – głębokość zalegania stropu komór, h – wysokość… H – deposition of the chambers' roof, h – chamber/pillar height, 1 – chamber width, a – pillar width

gdzie:
γ – średni ciężar objętościowy skał nadległych, MN/m^3;
H – głębokość zalegania stropu komór, m;
l – szerokość komór przyległych do filara, m;
a – szerokość filara, m.

Przyjmując, że ciśnienie pionowe p_z można przedstawić jako

$$p_z = \gamma H \tag{2}$$

wówczas wzór (1) przyjmie postać

$$\sigma_z = p_z(1 + \frac{l}{a}) \tag{3}$$

Aby zapewnić stateczność filara, naprężenia pionowe σ_z nie mogą przekraczać wytrzymałości na ściskanie R_c skał budujących filar

$$\sigma_z \le R_c \tag{4}$$

gdzie:
R_c – wytrzymałość na ściskanie, MPa.

W trakcie prowadzenia laboratoryjnych badań wytrzymałościowych soli na próbkach prostopadłościennych zauważono, że na wynik końcowy mają wpływ m.in. proporcje boków badanych próbek. W szczególności chodzi o proporcje pomiędzy wysokością próbki a bokiem jej podstawy, co w zagadnieniach mechaniczno-wytrzymałościowych określa się mianem smukłości próbki λ, którą można zdefiniować jako

$$\lambda = \frac{h}{b} \tag{5}$$

gdzie:
h – wysokość próbki prostopadłościennej o podstawie kwadratu, cm;
b – długość boku podstawy próbki, cm.

Powyższą zależność poprzez analogię niektórzy badacze uwzględniali w swoich rozwiązaniach analitycznych w odniesieniu do wymiarów filara międzykomorowego. Poniżej przedstawiono kilka zaproponowanych rozwiązań, a następnie poddano je dyskusji.

2.1. Metoda Stamatiu

Na podstawie prowadzonych badań laboratoryjnych polegających na ściskaniu prostopadłościanów o podstawie kwadratowej z soli kamiennej, przy zmiennym stosunku szerokości podstawy próbki b do jej wysokości h Stamatiu podał zależność empiryczną, która określa wytrzymałość na ściskanie R_c w odniesieniu do wytrzymałości doraźnej na ściskanie R_{co}, zbadanej na próbkach sześciennych o boku b z uwzględnieniem proporcji wymiarów próbki [1, 7, 8]. Zaproponowaną zależność można ująć w postaci

$$R_C = R_{CO}\sqrt{\frac{b}{h}} \tag{6}$$

gdzie:
R_c – wytrzymałość na ściskanie próbki o wymiarach $b \neq h$, MPa;
R_{co} – wytrzymałość na ściskanie próbki o wymiarach $b = h$, MPa;
b – szerokość podstawy próbki, cm;
h – wysokość próbki, cm.

Wstawiając powyższe równanie (ale z oznaczeniami odnoszącymi się do filara międzykomorowego jak na rys. 1) do nierówności (4) oraz uwzględniając równanie (3) otrzymuje się wzór

$$p_z(1 + \frac{l}{a}) \le R_{CO}\sqrt{\frac{a}{h}} \tag{7}$$

2.2. Metoda Sałustowicza-Dziunikowskiego

Rozwiązanie tego samego problemu zaproponowali Sałustowicz i Dziunikowski [6] w postaci równania

$$R_C = R_{CO}(\alpha + \beta\frac{b}{h}) \tag{8}$$

gdzie:
α, β – stałe materiałowe;
pozostałe oznaczenia jak we wzorze (6).

W wyniku prowadzonych badań laboratoryjnych i rozważań teoretycznych badacze stwierdzili, że stałe materiałowe w przybliżeniu można przyjąć jako $\alpha = 0{,}75$ i $\beta = 0{,}25$. Uwzględniając wartość przyjętych stałych oraz przekształcając nierówność (4) podobnie jak dla uzyskania równania (7), tym razem otrzymuje się następujący związek

$$p_z = (1 + \frac{l}{a}) \le R_{CO}(0{,}75 + 0{,}25\frac{a}{h}) \tag{9}$$

2.3. Metoda Köhslinga

Autor metody na podstawie badań laboratoryjnych wyznaczył krzywą określającą zależność pomiędzy smukłością próbki λ a jej wytrzymałością na ściskanie R_c [3]. Podobnie jak w wyżej opisanych metodach, za wytrzymałość „wzorco-

wą" przyjął doraźną wytrzymałość na ściskanie określoną na próbkach sześciennych R_{co}. Swoje rozważania ujął w formule

$$R_C = R_{CO} f(\lambda) \tag{10}$$

gdzie,

f(λ) – funkcja, której wartość należy odczytać z zamieszczonego w pracy [3] wykresu.

Analizując wykres z pracy [3], można stwierdzić, że jest on jakościowo bardzo zbieżny z wynikami uzyskanymi przez badaczy niemieckich, którzy prowadzili analogiczne badania na próbkach cylindrycznych [5].

W kolejnej pracy autor przedstawił równanie opisujące funkcję f(λ) [4]

$$f(\lambda) = 0{,}63 + 2{,}95223e^{(-2{,}07\lambda)} \tag{11}$$

wobec czego wzór (10) przyjmie postać

$$R_C = R_{CO}\,[0{,}63 + 2{,}95223e^{(-2{,}07\lambda)}] \tag{12}$$

Podstawiając do nierówności (4) równanie (3) oraz (12) z uwzględnieniem zależności (5), ale w odniesieniu do filara międzykomorowego powstanie nierówność

$$p_z \cdot (1 + \tfrac{l}{a}) \le R_{CO}\,[0{,}63 + 2{,}95223e^{(-2{,}07\frac{h}{a})}] \tag{13}$$

3. Analiza wyników

Dokonując przekształcenia wzorów (7), (9) i (13) w taki sposób, aby po jednej stronie pojawiły się tylko człony związane z wymiarami filara otrzymano

$$\frac{p_z(1+\frac{l}{a})}{R_{CO}} \le \sqrt{\tfrac{a}{h}} \text{ – metoda Stamatiu} \tag{14}$$

$$\frac{p_z(1+\frac{l}{a})}{R_{CO}} \le (0{,}75 + 0{,}25\tfrac{a}{h}) \text{ – metoda Sałustowicza-Dziunikowskiego} \tag{15}$$

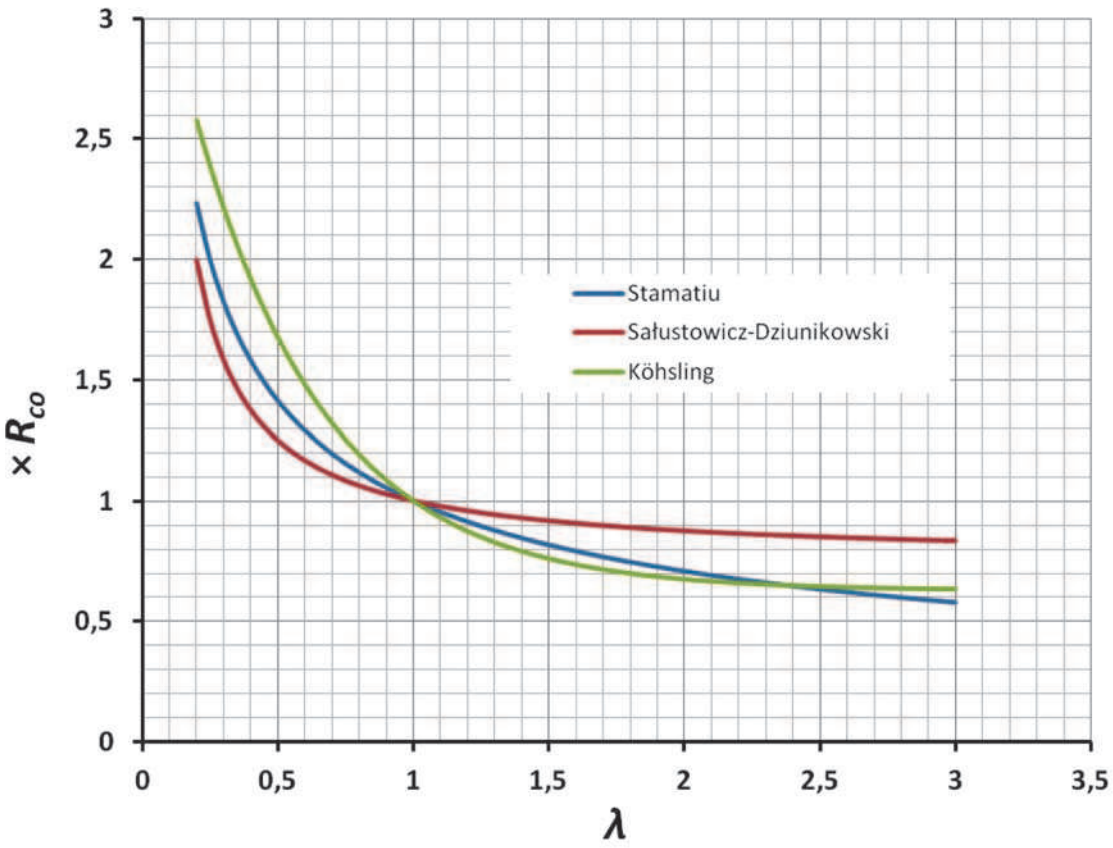
$$\frac{p_z(1+\frac{l}{a})}{R_{CO}} \le [0{,}63 + 2{,}95223e^{(-2{,}07\frac{h}{a})}] \text{ – metoda Köhslinga} \tag{16}$$

Łatwo zauważyć, że lewe strony nierówności (14), (15) i (16) są identyczne, natomiast ich prawe strony stanowią kryteria założone przez poszczególnych autorów, a które w rzeczywistości mogą być traktowane jako współczynniki korekcyjne wynikające z proporcji wymiarów próbek (filarów). Jak wobec tego mają się one względem siebie? Od strony matematycznej oczekiwaną odpowiedź można zapisać jako

$$\sqrt{\tfrac{a}{h}} \cong 0{,}75 + 0{,}25\tfrac{a}{h} \cong 0{,}63 + 2{,}95223e^{(-2{,}07\frac{h}{a})} \tag{17}$$

W celu odpowiedzi na to pytanie przeprowadzono proste przeliczenia dla wartości smukłości λ = 0,2 ÷ 3,0. Uzyskane wyniki dla analizowanych metod przedstawiono w postaci wykresów zależności pomiędzy smukłością próbki a jej wytrzymałością na ściskanie (rys. 2).

Wykreślone krzywe jakościowo są bardzo do siebie podobne, jednak wyniki ilościowe są na tyle rozbieżne, że wymagają głębszej analizy. O ile rozbieżność poszczególnych wyników dla λ = 0,8 ÷ 1,2 mieści się w granicach ≈ 10 ÷ 12%, to już w skrajnych wartościach λ różnica wynosi ≈ 30 ÷



Rys. 2. Wykres zależności pomiędzy smukłością próbki a jej wytrzymałością na ściskanie
Fig. 2. Graph of relationship between the slenderness of the sample and its compressive strength

44%. Kolejne pytanie, jakie nasuwa się po pierwszej analizie, będzie dotyczyło poziomu bezpieczeństwa przy określaniu wymiarów filara międzykomorowego. Analizując przedstawiony wykres widać, że w punkcie dla $\lambda = 1,0$ wszystkie krzywe się przecinają, co wynika z założeń poszczególnych metod – próbka sześcienna, której smukłość $\lambda = 1,0$ jest punktem wyjścia, a zarazem granicą rozdzielającą płaszczyznę, w której rozpatrywane są próbki o małej smukłości ($\lambda < 1,0$) – lewa część wykresu, oraz prawa część wykresu dotycząca próbek o większej smukłości ($\lambda > 1,0$). Jak widać z wykresów, w części lewej w przedziale dla $\lambda = 0,2 \div 1,0$ rozwiązanie Sałustowicza-Dziunikowskiego jest najbardziej zachowawczym. W części prawej wykresu w przedziale dla $\lambda = 1,0 \div 3,0$ bezpieczniejszymi wydają się być rozwiązania Stamatiu i Köhslinga, które mają bardzo zbliżone wartości.

W celach porównawczych, dla odzwierciedlenia różnic ilościowych, zestawiono kilka wybranych wyników dla różnych smukłości λ (tab. 1).

Aby poszczególne metody mogły być stosowane „zamiennie", wydaje się być zasadne zastosowanie współczynnika bezpieczeństwa n, który z odpowiednim zapasem będzie niwelował wykazane różnice uzyskanych wyników wg poszczególnych metod. Zgodnie z zaleceniami ISRM (International Society for Rock Mechanics) współczynnik bezpieczeństwa powinien wynosić $n = 1,5$. Taka wartość współczynnika spełnia swoją rolę w odniesieniu do wyników, które można określić jako najmniej korzystne. Należałoby jednak rozważyć, czy zasadne jest utrzymywanie stałej wartości współczynnika dla wszystkich metod oraz w całym zakresie przeprowadzonej powyżej analizy.

Tablica 1. Wartości współczynników korekcyjnych w zależności od smukłości

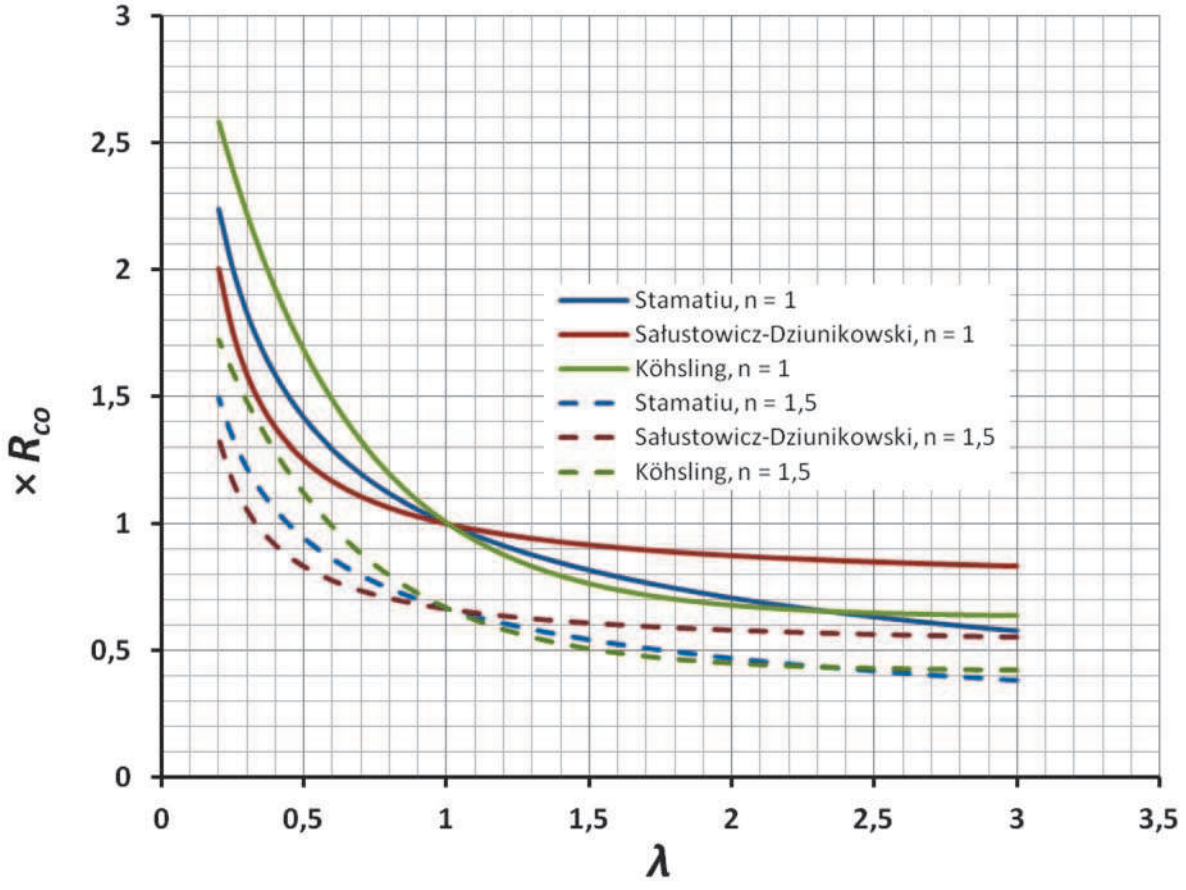
Table 1. Values of the correction factors depending on the slenderness ratio

metoda \ λ	0,2	0,6	0,8	1,0	1,2	1,5	2,0	3,0
Stamatiu	2,24	1,29	1,12	1,0	0,91	0,82	0,71	0,58
Sałustowicz-Dziunikowski	2,00	1,17	1,06	1,0	0,96	0,92	0,88	0,83
Köhsling	2,58	1,48	1,19	1,0	0,88	0,76	0,68	0,63

Na kolejnym rysunku (rys. 3) przedstawiono porównawczo wykresy omawianych rozwiązań z uwzględnieniem współczynnika bezpieczeństwa $n = 1,5$. Jak widać, w rozpatrywanym zakresie smukłości wszystkie wykresy uwzględniające rekomendowany współczynnik bezpieczeństwa znajdują się poniżej wykresów opisanych dla $n = 1$, a więc są po tzw. stronie bezpiecznej.

4. Przykłady

W celu pokazania praktycznych wyników, jakie można uzyskać z wymienionych metod przeanalizowano dwa rze-



Rys. 3. Wykres zależności pomiędzy smukłością próbki a jej wytrzymałością na ściskanie dla współczynnika bezpieczeństwa $n = 1$ i $n = 1,5$

Fig. 3. Chart of dependence comparison between the slenderness of the sample and its compressive strength for safety quotient $n = 1$ and $n = 1.5$

czywiste przypadki zaczerpnięte z Kopalni Soli „Kłodawa" przy różnych smukłościach filarów międzykomorowych oraz różnych współczynnikach bezpieczeństwa. Dla porównania wyliczono faktyczny współczynnik bezpieczeństwa dla istniejącego filara.

Przypadek 1: głębokość stropu komory H = 497,3 m, wysokość komory h = 27,7 m, szerokość komory l = 15,0 m, ciężar objętościowy nadkładu γ = 22 kN/m^3, doraźna wytrzymałość na ściskanie R_{co} = 34 MPa. Poszukiwaną wartością jest minimalna szerokość filara międzykomorowego a. Wyniki zestawiono w tabeli (tab. 2).

Tablica 2. Minimalna szerokość filara międzykomorowego dla przyjętego współczynnika bezpieczeństwa, m
Table 2. Minimum width of the inter-chamber pillar for the assumed safety factor, m

metoda / n	Stamatiu	Sałustowicz-Dziunikowski	Köhsling
n =1	13,15	9,41	13,68
n =1,5	19,87	17,15	21,12

W omawianym przypadku faktycznie istniejący filar ma szerokość a = 15 m, a jego smukłość wynosi λ = 1,85. Obliczone współczynniki bezpieczeństwa zestawiono w tabeli (tab.3).

Tablica 3. Rzeczywisty współczynnik bezpieczeństwa dla istniejącego filara
Table 3. Actual safety quotient for the existing pillar

metoda / λ	Stamatiu	Sałustowicz-Dziunikowski	Köhsling
λ =1,85	1,14	1,38	1,08

Przypadek 2: głębokość stropu komory H = 740,4 m, wysokość komory h = 12,0 m, szerokość komory l = 12,0 m, ciężar objętościowy nadkładu γ = 22 kN/m^3, doraźna wytrzymałość na ściskanie R_{co} = 34 MPa. Poszukiwaną wartością jest minimalna szerokość filara międzykomorowego a. Wyniki zestawiono w tabeli (tab. 4).

Tablica 4. Minimalna szerokość filara międzykomorowego dla przyjętego współczynnika bezpieczeństwa, m
Table 4. Minimum width of the inter-chamber pillar for the assumed safety factor, m

metoda / n	Stamatiu	Sałustowicz-Dziunikowski	Köhsling
n =1	11,50	11,39	11,58
n =1,5	17,56	19,61	16,03

W omawianym przypadku faktycznie istniejący filar ma szerokość a = 18,0 m, a jego smukłość wynosi λ = 0,67. Obliczone współczynniki bezpieczeństwa zestawiono w tabeli (tab.5).

Tablica 5. Rzeczywisty współczynnik bezpieczeństwa dla istniejącego filara
Table 5. Actual safety quotient for the existing pillar

metoda / λ	Stamatiu	Sałustowicz-Dziunikowski	Köhsling
λ = 0,67	1,53	1,3	1,58

5. Podsumowanie

Zaprezentowane metody wymiarowania filarów międzykomorowych jako kryterium wytrzymałościowe traktują iloczyn doraźnej wytrzymałości na ściskanie określonej na sześciennej próbce soli kamiennej oraz pewnej zależności uwzględniającej smukłość próbki, poprzez analogię przenoszonej na filar międzykomorowy. Uzyskane wyniki charakteryzują się dość dużym rozrzutem, w szczególności dla skrajnych wartości smukłości λ. I tak, dla λ = 0,2 różnica wyników z poszczególnych metod wynosi ok. 30%, a dla λ = 3,0 różnica ta wynosi ok. 44%. Równocześnie trudno przypisać do którejkolwiek z przedstawionych metod większą czy mniejszą wiarygodność, skoro wszystkie oparte były na badaniach laboratoryjnych. Można co najwyżej zarzucić brak jednolitej metodyki prowadzonych badań, polegającej np. na różnej prędkości przykładania obciążenia, a co – jak wynika z dotychczasowych doświadczeń – może mieć wpływ na końcowy wynik pomiarów.

Niewątpliwie same badania były obciążone błędem wynikającym, np. z niejednorodności próbek, trudności zorientowania próbki w maszynie wytrzymałościowej z jej faktycznym położeniem w górotworze, liczebnością przebadanych próbek etc. W tej sytuacji wprowadzenie współczynnika bezpieczeństwa jest jak najbardziej uzasadnione.

Należy zwrócić uwagę na fakt, że powyższe metody uwzględniają smukłość jako jedyne kryterium spadku/wzrostu wytrzymałości na ściskanie, natomiast całkowicie pomijają inne istotne czynniki, jak choćby smukłość w kierunku poziomym (czynnik jak najbardziej adekwatny wobec wymiaru poziomego filarów w systemie komorowym) czy spadek wytrzymałości w funkcji czasu. Już tylko te dwa wymienione elementy czynią, że omówione metody są niepełne i istnieje spory obszar badawczy do dalszych analiz. Dopiero dalsze zgłębienie tej wiedzy może dać odpowiedź, czy współczynnik bezpieczeństwa na poziomie n = 1,5 jest wystarczający i dający pewność statecznej pracy filarów, choć jak widać z przytoczonych przykładów filary zachowują swoją stateczność na przestrzeni ostatnich 35 lat (vide analizowany Przypadek 1) przy znacznie niższych wartościach współczynnika bezpieczeństwa od rekomendowanego przez ISRM.

Praca została wykonana w ramach badań statutowych nr 11.11.100.775.

Literatura

1. *Kłeczek Z.*: Geomechanika górnicza. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1994.
2. *Köhsling J.*: Metodyka wyznaczania filarów górniczych dla podziemnych kopalń surowców chemicznych. Maszynopis niepublikowany, Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Górnictwa Surowców Chemicznych „Chemkop", Kraków 1976.
3. *Köhsling J.*: Zasady wymiarowania filarów międzykomorowych w podziemnych kopalniach soli kamiennej.„Przegląd Górniczy" 1976, nr 12, s. 536-542.
4. *Köhsling J.*: Warunki bezpieczeństwa podziemnych kopalń soli w wysadach solnych. „Przegląd Górniczy" 1980, nr 9, s. 442-445.
5. *Pforr H., Rosetz G. P.*: Ergebnisse und Erfahrungen bei Druck- und Zugversuchen an Gesteinen des Kalibergbaus: Beitrag zum Festigkeitskatalog und zur Erfassung des natürlichen Gesteinsverhaltens. Freiberger Forschungshefte; Reihe A Geotechnik, Ingenieurgeologie, Bergbautechnologie, Verfahrenstechnik, Nr 376, s. 1-136, 1966.
6. *Sałustowicz A., Dziunikowski L.*: Wytrzymałość górotworu przy eksploatacji złoża solnego komorami poziomymi i pionowymi, w: Krajowy Zjazd BHP na temat Nauka i technika w walce o bezpieczeństwo w górnictwie,

Sekcja III, Osiągnięcia nauki i techniki w zakresie kierowania stropem oraz zwalczania tąpań i obrywanie się skał. Państwowa Rada Górnictwa, Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Górnictwa, Katowice 1963.
7. *Sałustowicz A*.: Zarys mechaniki górotworu. Wydawnictwo „Śląsk", Katowice 1968.
8. *Stamatiu M*.: Rasczot celikov na solanych rudnikach. Wyd. Gosgorchimizdat, Moskwa, 1963, (tłumaczenie z języka rumuńskiego – tytuł oryginału: Problema dimensionarii stilpilor la minele de sare din RPR. Editura Academiei Republici Populari Romine, Bucarest, 1959).

NACZELNY REDAKTOR
w zeszycie 1-2/2010 Przeglądu Górniczego, zwrócił się do kadr górniczych z zachętą do publikowania artykułów ukierunkowanych na wywołanie
POLEMIKI – DYSKUSJI.
Trudnych problemów, które czekają na rzetelną, merytoryczną wymianę poglądów – jest wiele! Od niej – w znaczącej mierze – zależy skuteczność praktyki i nauki górniczej w działaniach na rzecz bezpieczeństwa górniczego oraz postępu technicznego i ekonomicznej efektywności eksploatacji złóż.
Od naszego wysiłku w poszukiwaniu najlepszych rozwiązań – zależy przyszłość polskiego górnictwa!!!