

**Geomechanika – element
projektowania podziemnych
magazynów i składowisk odpadów**



1. Kilka słów o podziemnym magazynowaniu

Podziemne magazynowanie

Bezzbiornikowe magazynowanie niektórych gazów, ropy naftowej i jej produktów oraz sporadycznie innych substancji w specjalnie wykonanych kawernach komorach, podziemnych wyrobiskach poeksploatacyjnych oraz porowatych strukturach skalnych

Podziemne magazynowanie – element inżynierii środowiska

W chwili obecnej podziemne magazynowanie stanowi bardzo istotny element inżynierii środowiska szeroko rozpowszechniony w wielu rozwiniętych krajach świata

Infrastruktura naziemna podziemnego magazynu gazu (PMG)



Uzasadnienie celowości podziemnego magazynowania

- **konieczność tworzenia odpowiednio dużych rezerw magazynowych surowców, głównie o znaczeniu strategicznym dla zapewnienia ciągłości funkcjonowania gospodarki kraju,**
- **wyeliminowanie lub ograniczenie zagrożenia dla ludzi oraz niebezpieczeństwa i uciążliwości dla środowiska naturalnego wywołanego magazynowaniem naziemnym,**
- **względy ekonomiczne – magazynowanie naziemne jest bardziej kosztowne, a surowe normy bezpieczeństwa powodują nieustanny wzrost kosztów ich budowy i utrzymania.**

Substancje magazynowane w podziemnych magazynach

Najczęściej magazynowanymi mediami na świecie są:

- **ropa naftowa,**
- **oleje napędowe i opałowe,**
- **propan-butan i jego pochodne,**
- **etylen,**
- **gaz koksowniczy,**
- **sprężone powietrze,**
- **CO₂**

W Polsce pod ziemią magazynuje się gaz ziemny oraz ropę i paliwa.

Rodzaje magazynów podziemnych

Rodzaj przestrzeni magazynowej

**Przestrzeń magazynowa
wytworzona w sposób
naturalny**

**Przestrzeń magazynowa
wytworzona w sposób
celowy**

**kolektory porowate w
wyczerpanych złożach gazu
ziemnego i ropy naftowej**

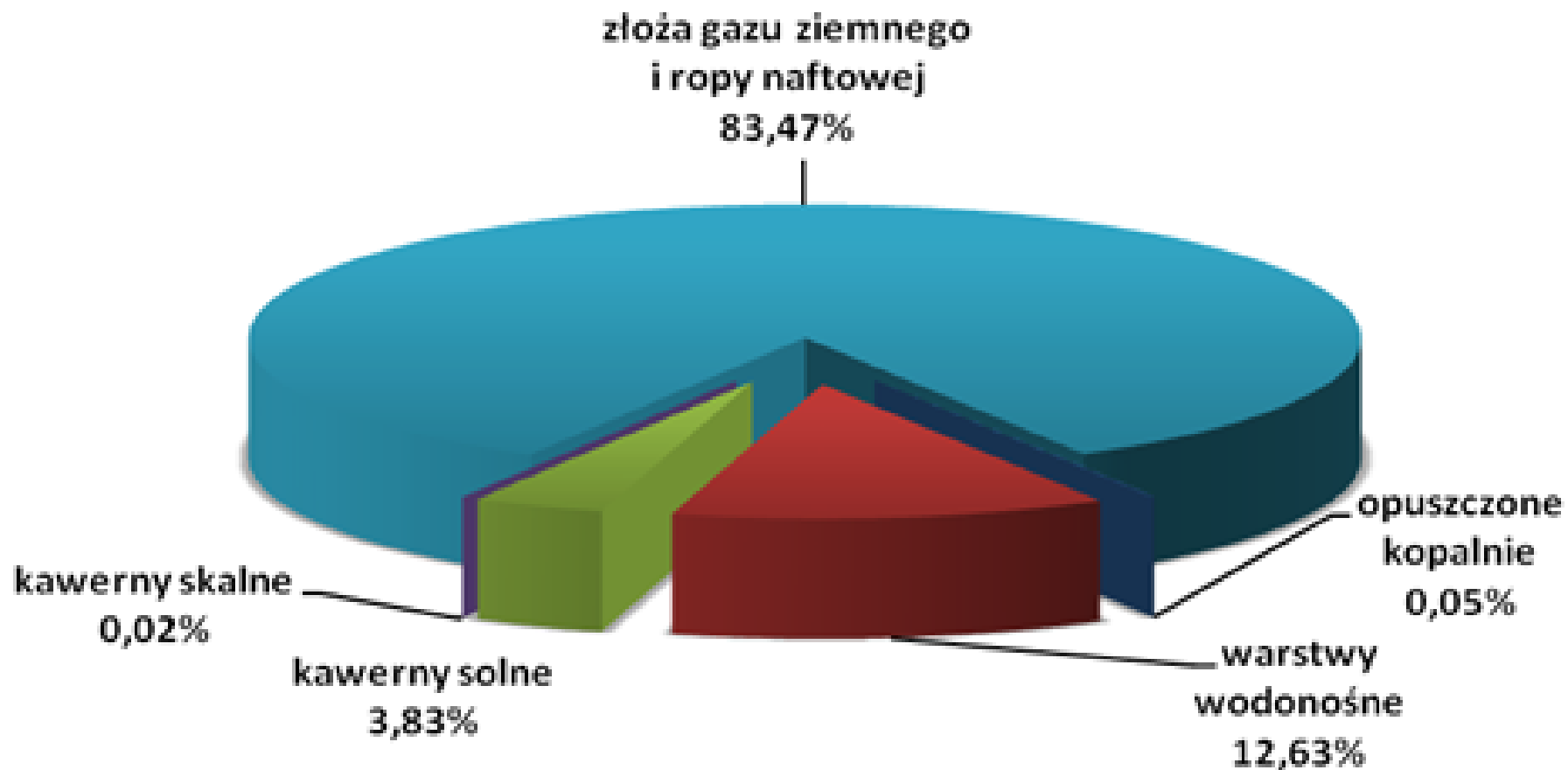
**kolektory porowate w
izolowanych warstwach
wodonośnych typu *aquifere***

**kawerny solne utworzone
w procesie ługowania**

**wyrobiska wykonane
specjalnie w skałach
metodami górniczymi**

**opuszczone podziemne
wyrobiska kopalniane**

Udział poszczególnych typów magazynów w łącznej pojemności czynnej magazynów na świecie



Rozmieszczenie podziemnych magazynów gazu (PMG) na świecie (Reinisch, 2000)

| Kontynent | Szczerpane złoża węglowodorów | Warstwy wodonośne | Kawerny solne | Opuszczone kopalnie | Razem |
|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------|----------------------|----------------------------|--------------|
| Ameryka Północna | 351 | 47 | 25 | 1 | 424 |
| Europa Zachodnia | 22 | 22 | 16 | 2 | 62 |
| Europa Wschodnia | 51 | 14 | 2 | - | 67 |
| Australia | 1 | - | - | - | 1 |
| Razem | 425 | 83 | 43 | 3 | 554 |

Podziemne magazyny w Polsce

Stan obecny – 6 magazynów gazu (PMG)

1 magazyn ropy i paliw (Magazyn Góra)

Podziemne magazyny gazu (PMG)

| Nazwa | Typ magazynu | Pojemność czynna mln [m ³] |
|--------------|----------------------|--|
| Swarzów | sczerpane złożę gazu | 90 |
| Strachocina | sczerpane złożę gazu | 330 |
| Brzeźnica | sczerpane złożę gazu | 65 |
| Husów | sczerpane złożę gazu | 350 |
| Wierzchowice | sczerpane złożę gazu | 575 |
| Mogilno | kawerna solna | 412 |
| Razem | | 1822 |

Perspektywy rozbudowy pojemności magazynowej

W budowie

- Kosakowo

Realizowana lub planowana rozbudowa

- Brzeźnica
- Husów
- Wierzchowice
- Mogilno

Planowana budowa nowych magazynów

- Bonikowo
 - Daszewo
 - Tarnów
 - Tuligłowy
 - Nowa Ruda
 - Moszczenica
- } w zaniechanych kopalniach

Rozmieszczenie podziemnych magazynów w Polsce



**2. Geomechaniczna
ocena masywu skalnego dla
potrzeb projektowania magazynów w
sczerpanych złożach ropy naftowej i gazu**

Charakterystyka magazynów w szcerpanych złożach ropy naftowej i gazu ziemnego



- najbardziej rozpowszechniony rodzaj PMG,
- najmniejsze koszty budowy, będące wynikiem:
 - istniejącej infrastruktury do zatłaczania i odbioru gazu,
 - znajomości parametrów geologiczno-złożowych rozpoznanych już na etapie eksploatacji,
- bardzo duża pojemność,
- praca w cyklach rocznych,
- wzrost pojemności porowej (czynnej) w kolejnych cyklach zatłaczania wskutek wypierania wód złożowych.

Zakres badań dla potrzeb geomechanicznej charakterystyki masywu skalnego

Najistotniejszymi elementami geomechanicznej oceny masywu skalnego jest:

- **wykazanie czy eksploatacja magazynu nie spowoduje zagrożenia w postaci rozszczelnienia ośrodka skalnego,**
- **wykazanie czy właściwości mechaniczne górotworu w otoczeniu magazynu zapewniają jego długotrwałą stateczność.**

Dokonanie takiej oceny wymaga wykonania odpowiednich badań właściwości mechanicznych oraz przeprowadzenia procedury obliczeń ciśnienia szczelinowania, tak dla skał serii złożowej jak i serii uszczelniających.

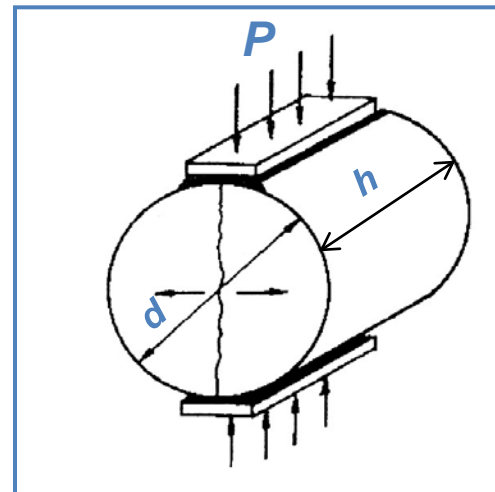
Badania właściwości mechanicznych obejmują:

- **oznaczenie wytrzymałości na rozciąganie,**
- **oznaczenie parametrów wytrzymałościowych i deformacyjnych w jednoosiowym lub trójosiowym stanie naprężenia.**

Oznaczanie wytrzymałości na rozciąganie σ_T

Wytrzymałość na rozciąganie stanowi podstawowy parametr obliczania ciśnienia szczelinowania.

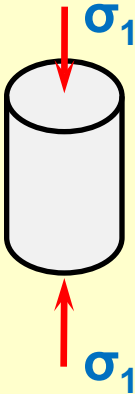
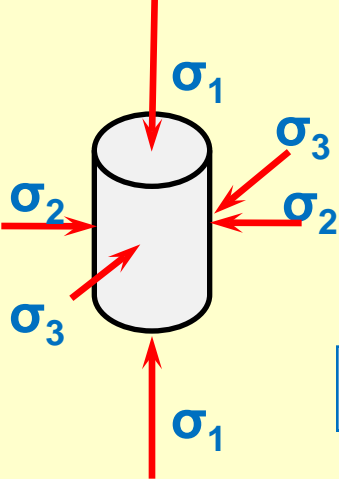


- metoda oznaczania – poprzecznego ściskania (metoda brazylijska),
- próbka – walec (krążek) o średnicy $d = 42 \text{ } 54 \text{ mm}$ i wysokości h równej połowie średnicy,
- sposób obciążania – siła ściskająca równomiernie rozłożona wzdłuż tworzącej poboczniczy walca,
- prędkość obciążania – 100 N/s ; prędkość odniesiona do przekroju poprzecznego – $0,1 \text{ } 0,5 \text{ MPa/s}$.



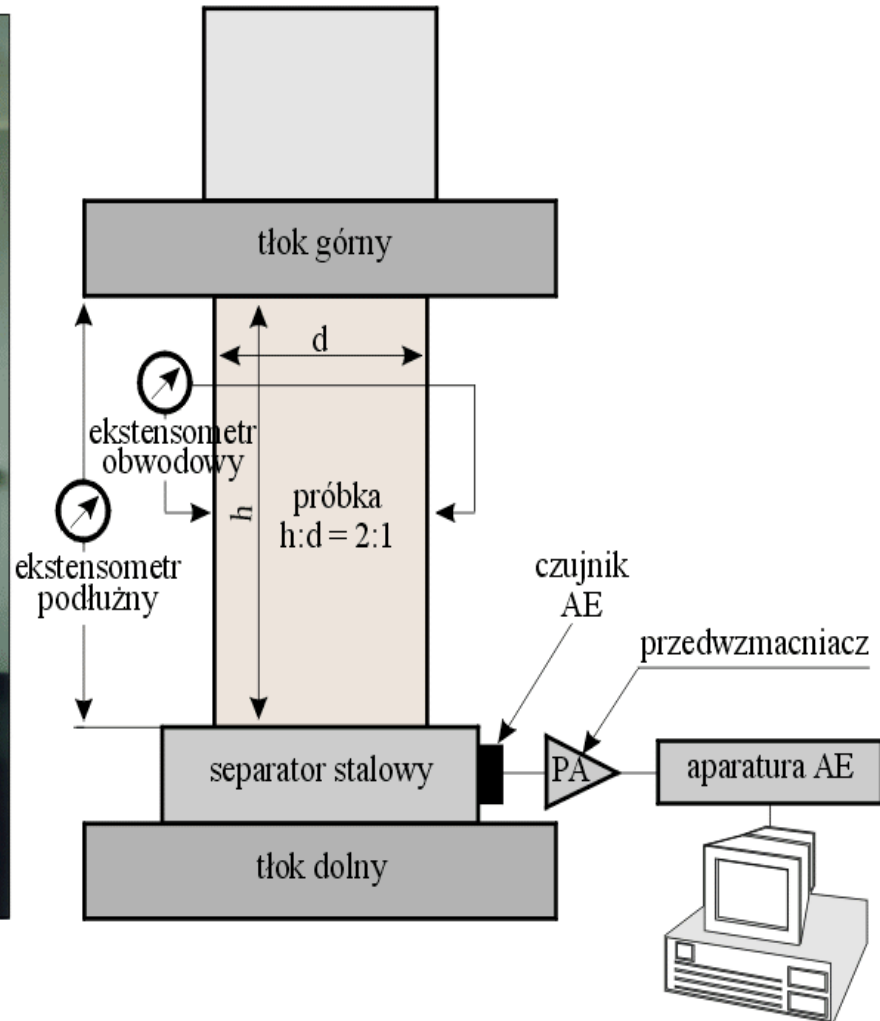
$$\sigma_T = \frac{2P}{\pi dh}$$

P – wartość siły przy której wystąpiło pęknięcie, [MN],
 d – średnica próbki, [m],
 h – wysokość próbki, [m]

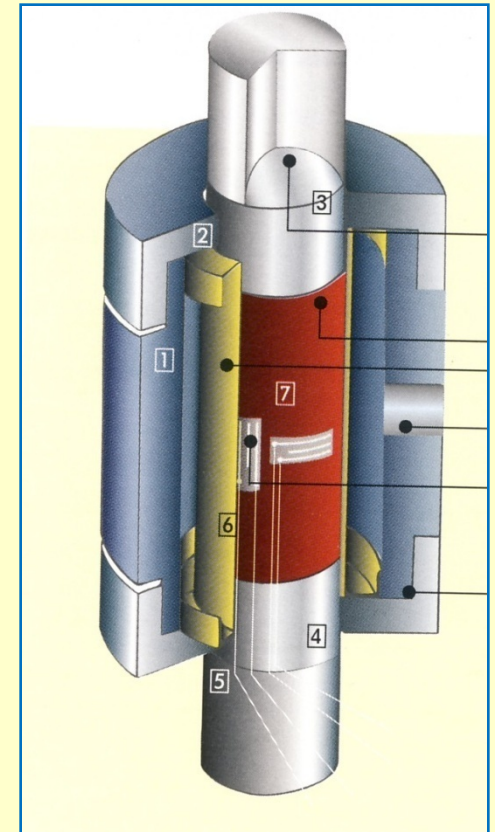
Ściskanie w jednoosiowym i trójosiowym stanie naprężenia

| Metoda | Jednoosiowe ściskanie | Trójosiowe ściskanie |
|--------------------------|---|---|
| Stan naprężenia |  <p>$\sigma_2 = \sigma_3 = 0$</p> |  <p>$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$</p> |
| Maszyna wytrzymałościowa |  |  <p><i>load cell and accessories</i></p> |

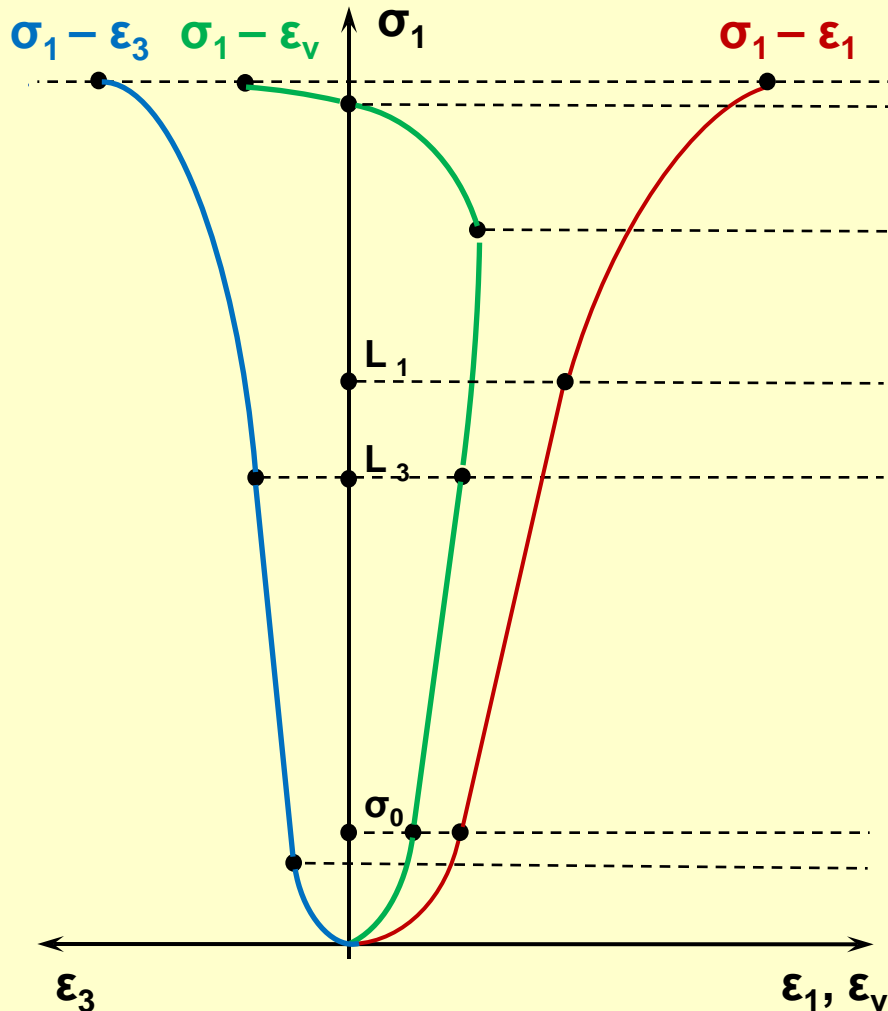
Prasa sztywna



Aparat do badania skał w trójosiowym stanie naprężenia



Charakterystyki naprężenie – odkształcenie w jednoosiowym stanie naprężenia



granica wytrzymałości

próg lokalizacji odkształceń

próg niestabilnej propagacji spękań

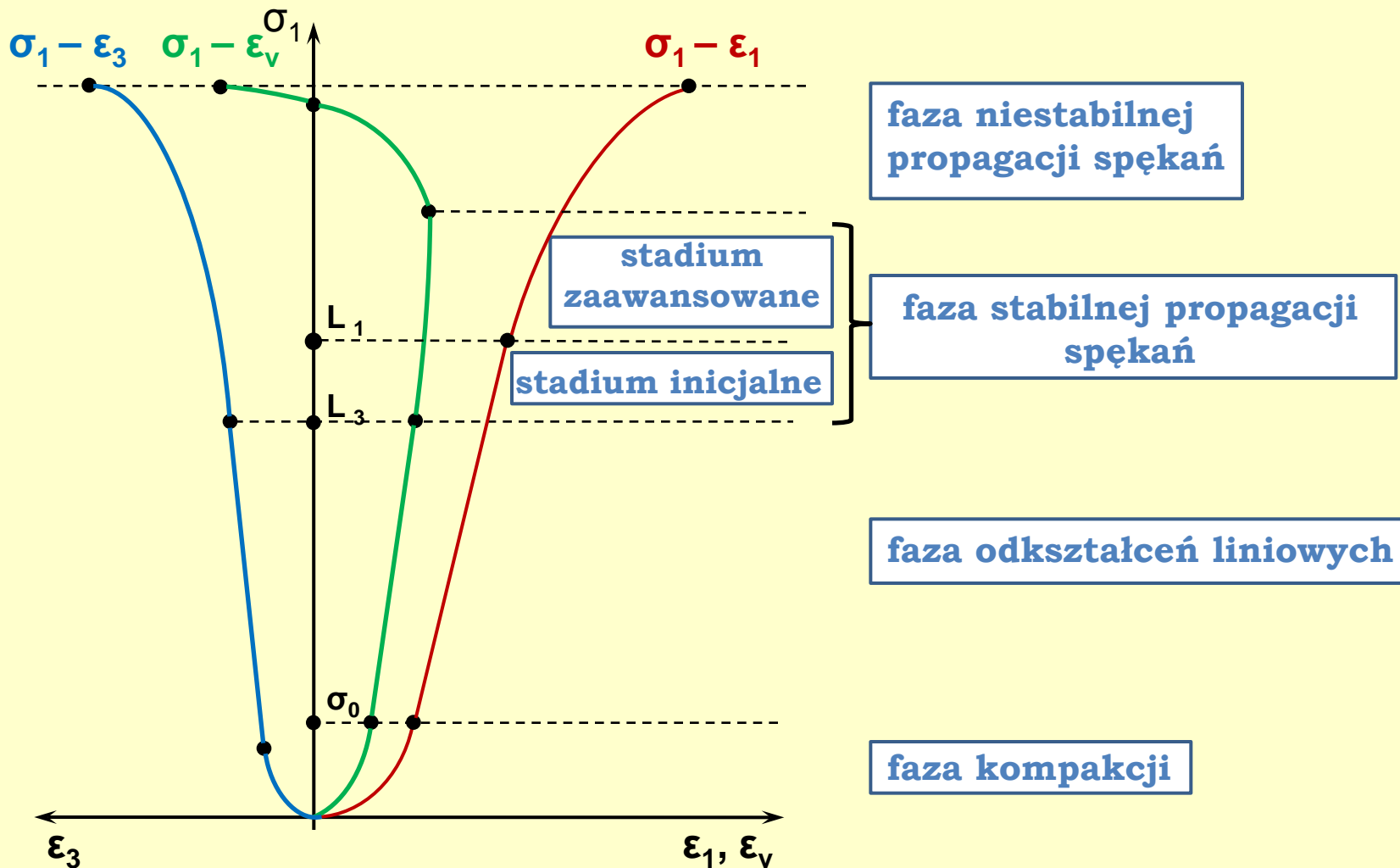
granica liniowości $\sigma_1 - \epsilon_1$

granica liniowości $\sigma_1 - \epsilon_3$; $\sigma_1 - \epsilon_v$
(próg stabilnej propagacji spękań)

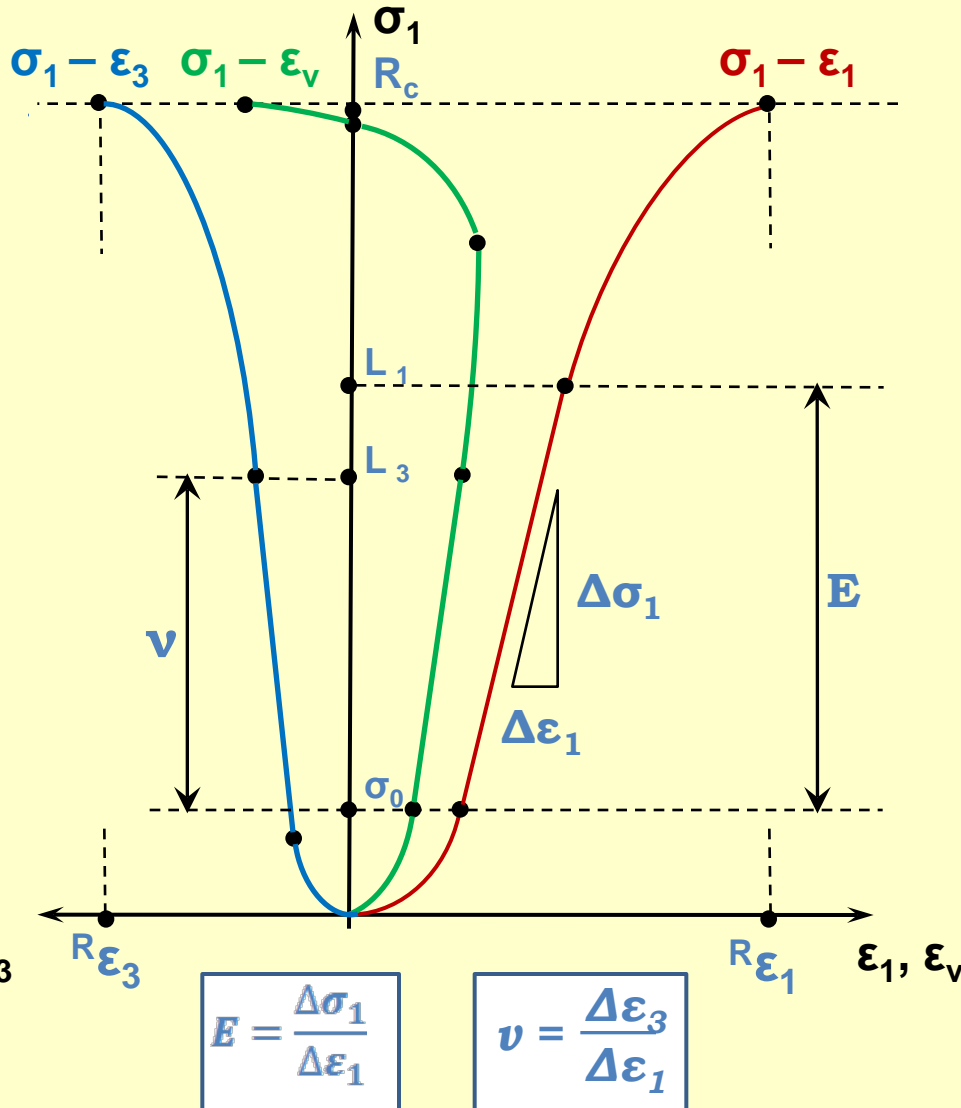
próg liniowości $\sigma_1 - \epsilon_1$; $\sigma_1 - \epsilon_v$

próg liniowości $\sigma_1 - \epsilon_3$

Fazy odkształceń stanu przedkrytycznego w badaniu jednoosiowego ściskania

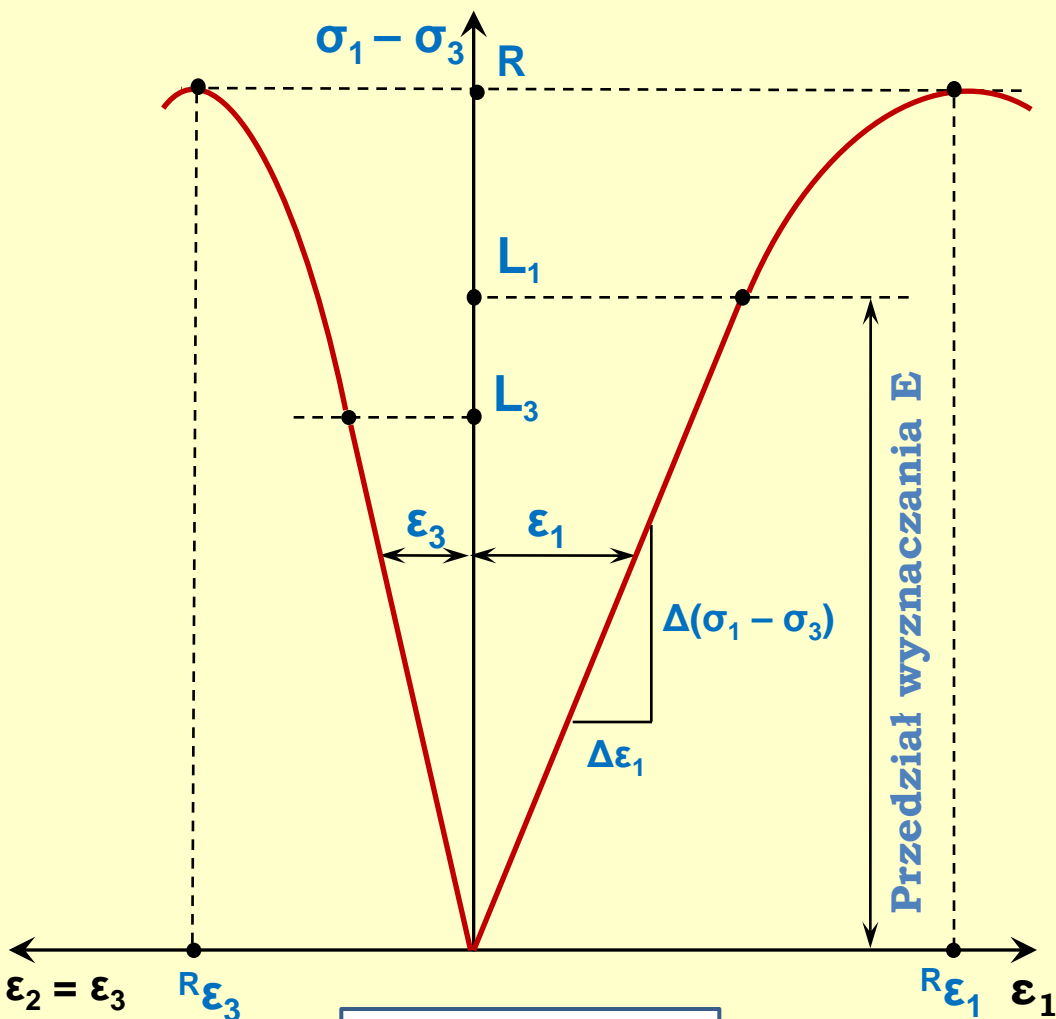


Parametry wytrzymałościowo-deformacyjne z testu jednoosiowego ściskania



- E - moduł sprężystości liniowej
- ν - współczynnik Poissona
- R_c - wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie,
- L_1 - granica sprężystości charakterystyki $\sigma_1 - \epsilon_1$,
- L_3 - granica sprężystości charakterystyki $\sigma_1 - \epsilon_3$,
- R_{ϵ_1} - odkształcenie osiowe na granicy wytrzymałości,
- R_{ϵ_3} - odkształcenie poprzeczne na granicy wytrzymałości
- σ_0 - ciśnienie zamykania szczelin

Parametry wytrzymałościowo-deformacyjne z testu trójosiowego ściskania



$$E = \frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)}{\Delta\epsilon_1}$$

- $R(\sigma_1 - \sigma_3)$ - wytrzymałość
- $L_1(\sigma_1 - \sigma_3)$ - naprężenie różnicowe na granicy liniowości odkształceń osiowych
- $L_3(\sigma_1 - \sigma_3)$ - naprężenie różnicowe na granicy liniowości odkształceń poprzecznych
- $R\epsilon_1$ - odkształcenie osiowe na granicy wytrzymałości
- $R\epsilon_3$ - odkształcenie poprzeczne na granicy wytrzymałości
- E - moduł sprężystości liniowej
- $c^{(1)}$ - spójność
- $\varphi^{(1)}$ - kąt tarcia wewnętrznego

1) na podstawie badań kilku próbek przy różnych σ_3

Procedura obliczania ciśnienia szczelinowania (1)

1. Pierwotny stan napięcia w górotworze

Wielkość naprężenia pionowego σ_v na głębokości H określa równanie:

$$\sigma_v = \int_0^H \rho(h) g dh \quad [\text{MPa}]$$

ρ – gęstość objętościowa skał nadkładu, $[\text{kg}/\text{m}^3]$,
 g – stała grawitacji,
 H – głębokość.

Jeżeli przyjmiemy stałą gęstość objętościową skał nadkładu powyższy wzór przyjmie postać:

$$\sigma_v = \rho \cdot g \cdot H \quad [\text{MPa}]$$

Procedura obliczania ciśnienia szczelinowania (2)

Wskutek braku możliwości rozszerzania się skał w poziomie w masywie górotworu powstają naprężenia poziome.

Wielkość naprężenia poziomego σ_H na głębokości H określa wzór:

$$\sigma_{H \min} = \frac{\nu}{1 - \nu} (\sigma_v - \alpha p) + \alpha p \quad [\text{MPa}]$$

$\sigma_{H \min}$ – minimalne naprężenie poziome, [MPa],

ν – współczynnik Poissona, [-],

p – ciśnienie porowe (przyjmuje się równe ciśnieniu odbioru gazu), [MPa],

α – stała Biota, [-].

Dla skał zbiornikowych złóż węglowodorów zwykle przyjmuje się:

$$\alpha = 0,7 \text{ oraz } \nu = 0,25.$$

Procedura obliczania ciśnienia szczelinowania (3)

2. Ciśnienie szczelinowania

Ciśnienie szczelinowania to ciśnienie przy którym następuje zniszczenie skały wskutek przekroczenia wytrzymałości.

Ciśnienie szczelinowania oblicza się w oparciu równania (Carnegie et,al..2002; Economides, Nolte, 1998):

- a) maksymalna wartość ciśnienia szczelinowania (górną granicą) [MPa]

$$\sigma_{f,max} = 3\sigma_{H,min} - \sigma_{H,max} - p + \sigma_{Tw}$$

- b) minimalna wartość ciśnienia szczelinowania (dolną granicą) [MPa]

$$\sigma_{f,min} = \frac{3\sigma_{H,min} - \sigma_{H,max} - 2\eta p + \sigma_{Tw}}{2(1 - \eta)}$$

Procedura obliczania ciśnienia szczelinowania (4)

- $\sigma_{H,min}$ - minimalne naprężenie poziome (równe naprężeniu geostatycznemu), [MPa],
- $\sigma_{H,max}$ - maksymalne naprężenie poziome (suma naprężenia geostatycznego i tektonicznego), [MPa],
- σ_{Tw} - wytrzymałość na rozciąganie próby nasyconej, [MPa],
- p - ciśnienie porowe, [MPa],
- η - współczynnik obliczany ze wzoru:

$$\eta = \frac{\alpha(1 - 2\nu)}{2(1 - \nu)}$$

α - stała Biota, [-],

ν - współczynnik Poissona

PMG „Swarzów”

1. Złoże pierwotne

- średnia głębokość zalegania 650 [m],
- pierwotne ciśnienie złożowe 7,65 [MPa],
- ciśnienie po zakończeniu eksploatacji 4,67 [MPa].
- zasoby wydobyte 234 mln m³
- zasoby pozostawione (buforowe) 85 mln m³

2. Charakterystyka pracy magazynu

- ciśnienie zatłaczania 7,80 [MPa],
- ciśnienie odbioru 4,55 [MPa],
- wydajność zatłaczania 700 m³/min (1 mln m³/doba)
- długość cyklu zatłaczania 100 – 120 dni
- długość cyklu odbioru 90 – 100 dni

PMG „Swarzów”

3. Pierwotny stan naprężenia

Dane do obliczeń:

$$H = 627 \text{ m}$$

$$\rho = 26,50 \text{ Mg/m}^3$$

$$\alpha = 0,7$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$p = 4,55 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0,25$$

$$\sigma_v = 16,30 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{H, \min} = \sigma_{H, \max} = 7,56 \text{ MPa}$$

4. Parametry wytrzymałościowo-deformacyjne

| Seria | R_C [MPa] | | σ_{Tw} [Mpa] | |
|----------------------|-----------------|-----------------|---------------------|-----------------|
| | Zakres wartości | Wartość średnia | Zakres wartości | Wartość średnia |
| Nadzłożowa | 11,5 – 34,4 | 22,65 | 0,7 – 2,1 | 1,37 |
| Poziomu magazynowego | 7,8 – 145,5 | 99,6 | 0,5 – 10,8 | 6,45 |
| Podzłożowa | 55,1 – 120,2 | 90,03 | 4,3 – 17,1 | 8,35 |

PMG „Swarzów”

5. Ciśnienie szczelinowania

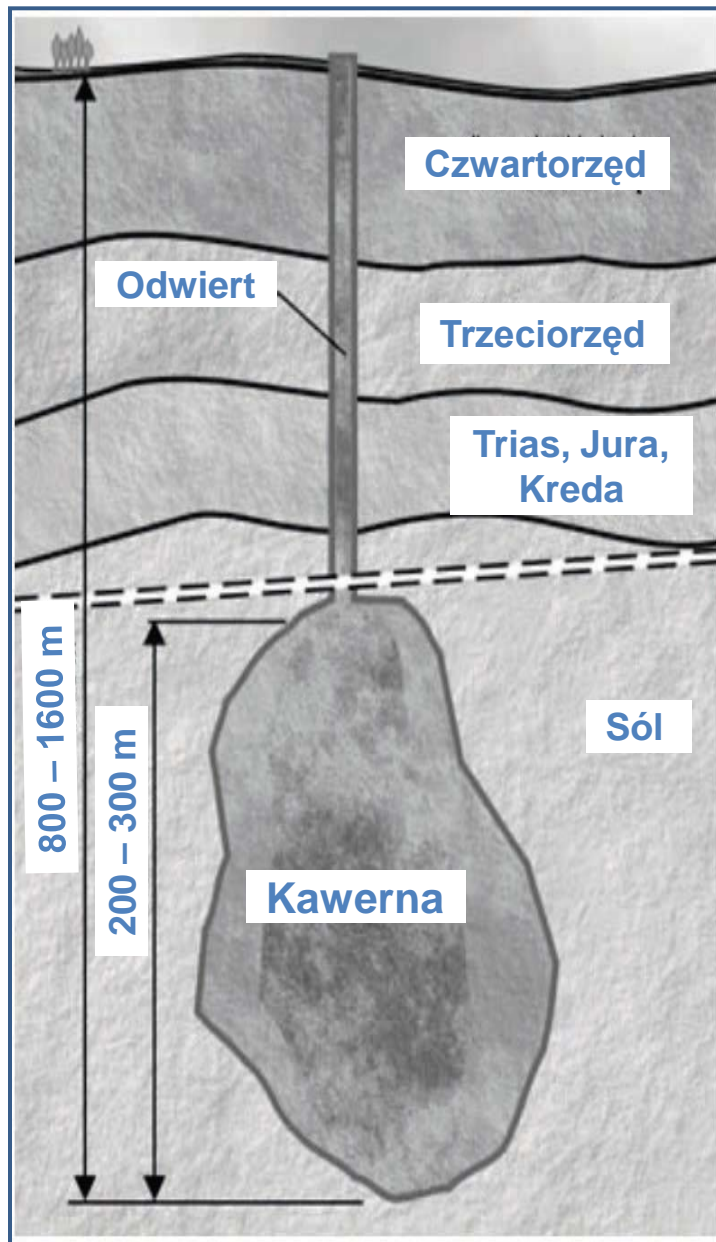
| Seria | $\sigma_{f, \min}$ [MPa] | $\sigma_{f, \max}$ [MPa] |
|----------------------|--------------------------|--------------------------|
| Nadzłożowa | 9,35 | 11,94 |
| Poziomu magazynowego | 12,65 | 17,02 |
| Podzłożowa | 13,88 | 18,92 |

6. Wnioski

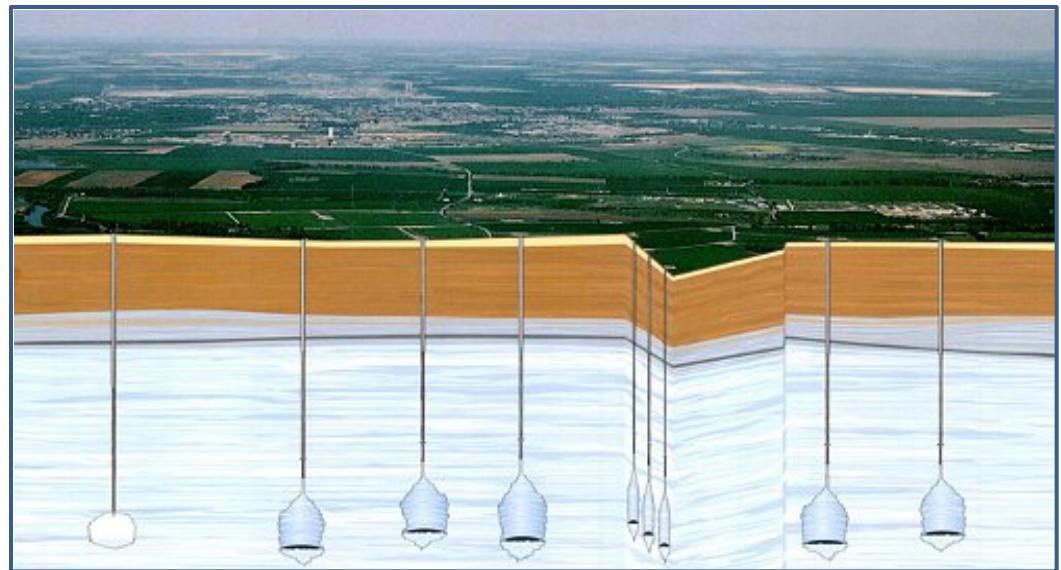
Wyliczone ciśnienia szczelinowania zarówno dla poziomu magazynowego, jak i serii uszczelniających poziom magazynowy są zatem wyższe od maksymalnej wartości ciśnienia dennego w fazie zatłaczania gazu ziemnego do złoża (PMG), tj. 7,8 MPa, co z kolei pozwala przyjąć, że założone w projekcie maksymalne ciśnienie robocze $P_{\max} = 7,8$ MPa nie zagraża rozszczeniem ośrodka skalnego.

**3. Geomechaniczna
ocena masywu skalnego
dla potrzeb projektowania
magazynów w kawernach solnych**

Charakterystyka magazynów w kawernach solnych



Kawerna solna – pusta przestrzeń w złożu soli wytworzona w procesie ługowania z otworu wiertniczego odwierconego z powierzchni (przypadek dominujący) lub powstała w wyniku eksploatacji złoża.

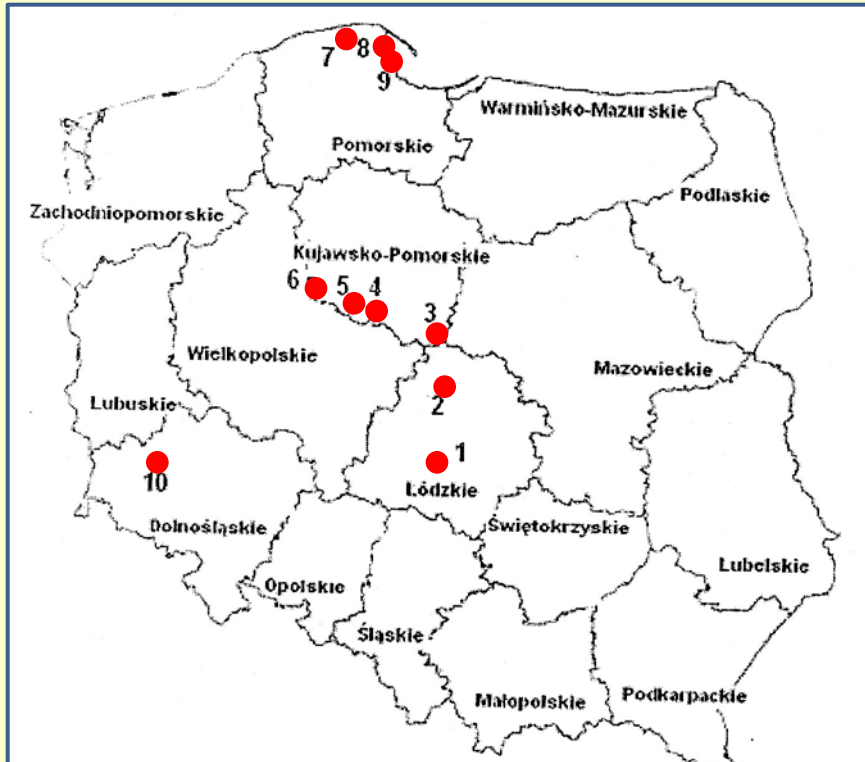


Magazyn kawernowy może stanowić jedną, kilka a nawet kilkadziesiąt kawern.

Zalety magazynów w kawernach solnych

- powszechnie uznane za najlepsze środowisko do magazynowania,
- duże pojemności magazynowe,
- korzystne własności geomechaniczne (zwięzłość, wytrzymałość) umożliwiające bezpieczne wykonanie wyrobisk,
- nieprzepuszczalność skał solnych – umożliwiająca izolację od wód podziemnych,
- długotrwała szczelność jako wynik plastycznego zachowanie się soli, która zamyka wszystkie pęknięcia,
- wysoki wydatek poboru gazu z kawern (100 000 m³/godz.) – spełnianie roli szczytowych magazynów do błyskawicznego pokrywania krótkotrwałych bardzo dużych deficytów gazu,
- możliwość pracy rewersyjnej (wielokrotnych cykli zatłaczania i odbioru gazu w ciągu roku),
- ługowalność soli – tanie wykonanie kawern,
- obojętność chemiczna soli względem większości magazynowanych substancji.

Warunki przydatności złoża soli do budowy magazynu



- złoże musi być nieprzepuszczalne, nie można budować magazynów w strefach porowatych i kawernistycznych,
- musi mieć odpowiednią formę, wielkość i głębokość zalegania,
- odpowiednie usytuowanie warstw w złożu i otaczającym górotworze,
- sól powinna mieć odpowiedni skład – w szczególności nie powinna zawierać większej ilości łatwo rozpuszczalnych soli potasowo-magnezowych.

Lokalizacja struktur solnych perspektywicznych do budowy kawernowych magazynów

1 – Bełchatów, 2 – Rogoźno, 3 – Lubień Kujawski, 4 – Łanięta, 5 – Izbica Kujawska, 6 – Damasławek, 7 – Łeba, 8 – Swarzewo, 9 – Mechelinki, 10 – złoże LGOM

W Polsce w chwili obecnej jest 1 magazyn kawernowy – Mogilno (8 kawerno pojemności 416 mln m³, docelowo 20 kawern o pojemności 1,15 mld m³).

Elementy geomechanicznego projektowania

Projektowanie magazynów w kawernach solnych składa się z dwóch części:

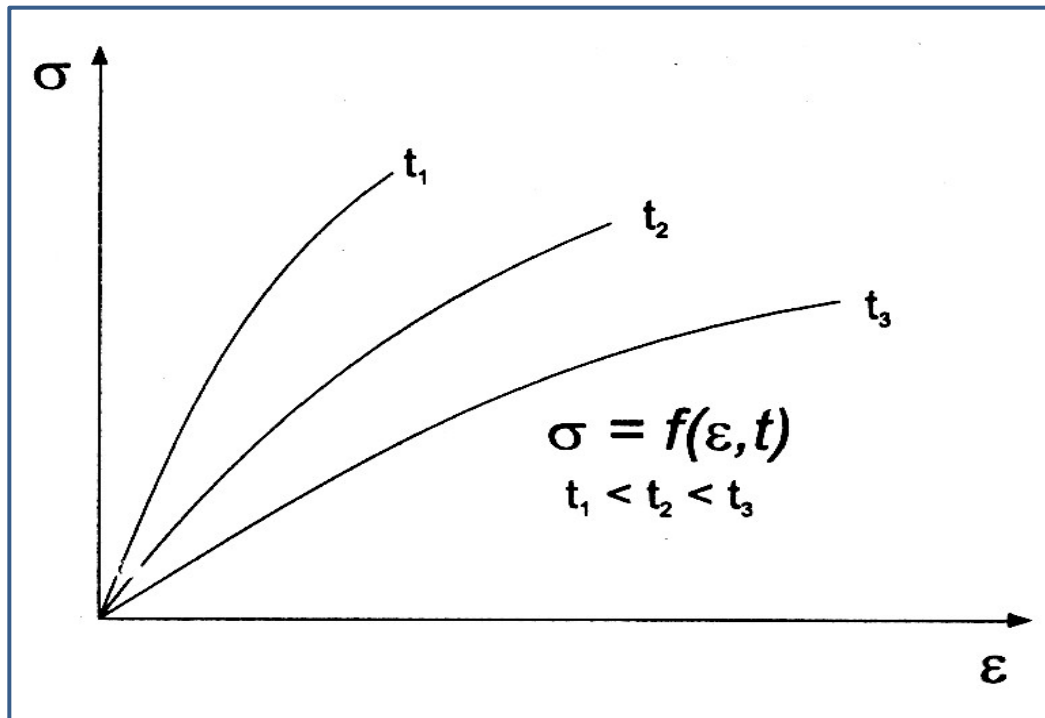
- części geomechanicznej,
- części dotyczącej technologii ługowania (wytworzenia kawerny).

Część geomechaniczna obejmuje określenie:

- głębokości posadowienia komór magazynowych, kształtu i wymiarów kawern oraz określenie wielkości calizn ochronnych w polu magazynowym w powiązaniu z ciśnieniem magazynowanego medium,
- warunku długotrwałej stateczności kawern,
- ekstremalnych wartości ciśnień magazynowanego medium:
 - ❑ maksymalnego dopuszczalnego ciśnienia szczelinowania,
 - ❑ minimalnego ciśnienia niezbędnego do wyparcia solanki,
 - ❑ minimalnego dopuszczalnego ciśnienia zapewniającego stateczność ścian kawerny i dopuszczalnej konwergencji komory solnej,
- maksymalnego dopuszczalnego wyężenie materiału na ścianie komory,
- dopuszczalnej wielkość konwergencji komory.

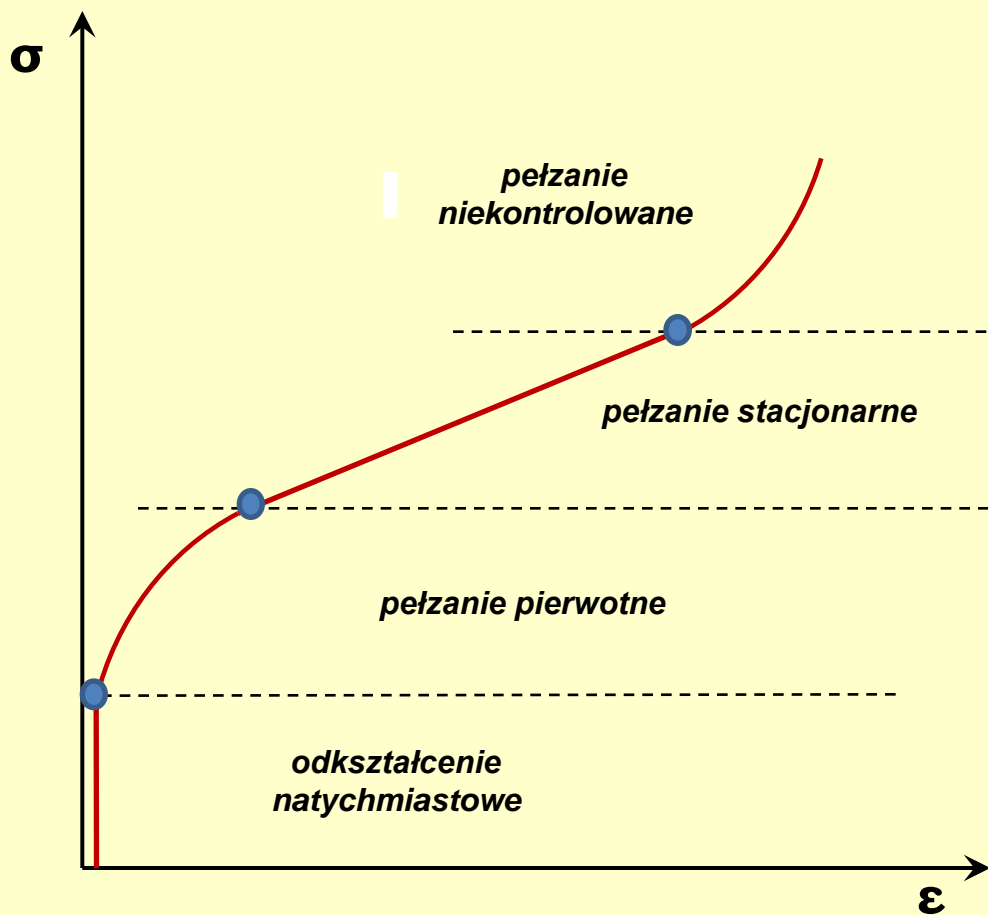
Specyficzne własności soli

Sól jest ośrodkiem reologicznym. Charakterystyczną cechą tych ośrodków jest istotny wpływ czasu na ich stan mechaniczny, a w szczególności na wielkość odkształceń. Uwidacznia się to między innymi w postaci zjawiska pełzania, polegającego na przyroście odkształceń w czasie przy stałej wielkości obciążeń.



Charakterystyki
naprężeniowo-deformacyjne
ośrodka reologicznego

Fazy odkształceń soli

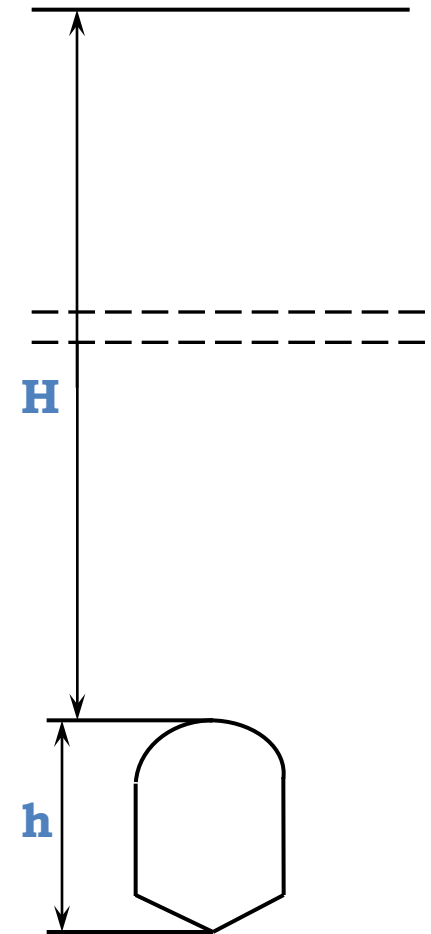


- O – A** odkształcenie sprężysto-plastyczne powstające natychmiast po przyłożeniu obciążenia,
- A – B** pełzanie pierwotne - odkształcenia zmierzają asymptotycznie do wartości charakterystycznych dla odkształceń sprężystych ; prędkość pełzania maleje,
- B – C** pełzanie stacjonarne - odkształcenia rosną liniowo z czasem; w tej fazie dochodzi do największych odkształceń,
- C – D** odkształcenia niekontrolowane, gwałtowne przyspieszenie odkształceń prowadzące do zniszczenia struktury.

Głębokość posadowienia i wymiary kawerny

Wraz z głębokością rośnie ciśnienie litostatyczne. Przekroczenie przez nacisk nadkładu granicy plastyczności powoduje, że w wyniku pełzania sól będzie wpływać do komory na całej jej powierzchni powodując zmniejszenie jej objętości, czyli tzw. **konwergencję**. Kawerny ulegają zaciskaniu, a otaczający górotwór ulega deformacjom i przemieszczeniom. Może to doprowadzić do rozszczelnienia oraz utraty stateczności. Sposobem przeciwdziałania utracie stateczności jest utrzymanie w komorze podwyższonego ciśnienia. tzw. **poduszki gazowej**, to jest gazu „martwego”, który musi pozostać w komorze.

Głębokość położenia stropu kawerny (H) oraz jej wysokość (h) są zatem ściśle powiązane z wartością minimalnego ciśnienia wymaganego dla zapewnienia stateczności kawerny.



Długotrwała stateczność kawerny

Długotrwała stateczność kawerny limitowana jest dwoma czynnikami:

- **dopuszczalną wielkością wyężenia materiału na ściankach kawerny**
 - ↳ **zbyt niskie ciśnienie magazynowanego medium powoduje wykruszanie się ścian oraz ich deformacje i przemieszczenia**
- **utrzymaniem szybkości konwergencji w dopuszczalnych granicach, czyli niedopuszczenie aby górotwór wszedł w fazę niekontrolowanych odkształceń**
 - ↳ **czym niższe ciśnienie tym kawerna ulega większej konwergencji**

Charakterystyka magazynów w kawernach solnych

Minimalne ciśnienie wymagane dla zapewnienia stateczności kawerny określa wzór:

$$n_1 p_w = \frac{2\nu R_r}{(1 - \nu)(R_c + R_r)} \gamma_{\text{śr}}(H + h) - \frac{R_c R_r}{R_c + R_r}$$

n_1 - współczynnik bezpieczeństwa ze względu na stateczność komory,

p_w - ciśnienie magazynowanego medium,

ν - współczynnik Poissona,

R_c - wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie,

R_r - wytrzymałość na rozciąganie,

$\gamma_{\text{śr}}$ - średni ciężar objętościowy skał nadkładu,

H - głębokość posadowienia stropu kawerny,

h - wysokość kawerny.

Maksymalne dopuszczalne ciśnienie szczelinowania

Jakkolwiek podwyższone ciśnienie magazynowanego medium wpływa korzystnie na stan naprężenia na konturze komory (zapewnia stateczność, przeciwdziała konwergencji) to z uwagi na szczelność nie można dopuścić do zjawiska szczelinowania górotworu.

Zjawisko szczelinowania zachodzi wówczas gdy ciśnienie p_w przekroczy wartość ciśnienia pierwotnego w stropie komory.

Zatem warunek szczelności komory przedstawia wzór:

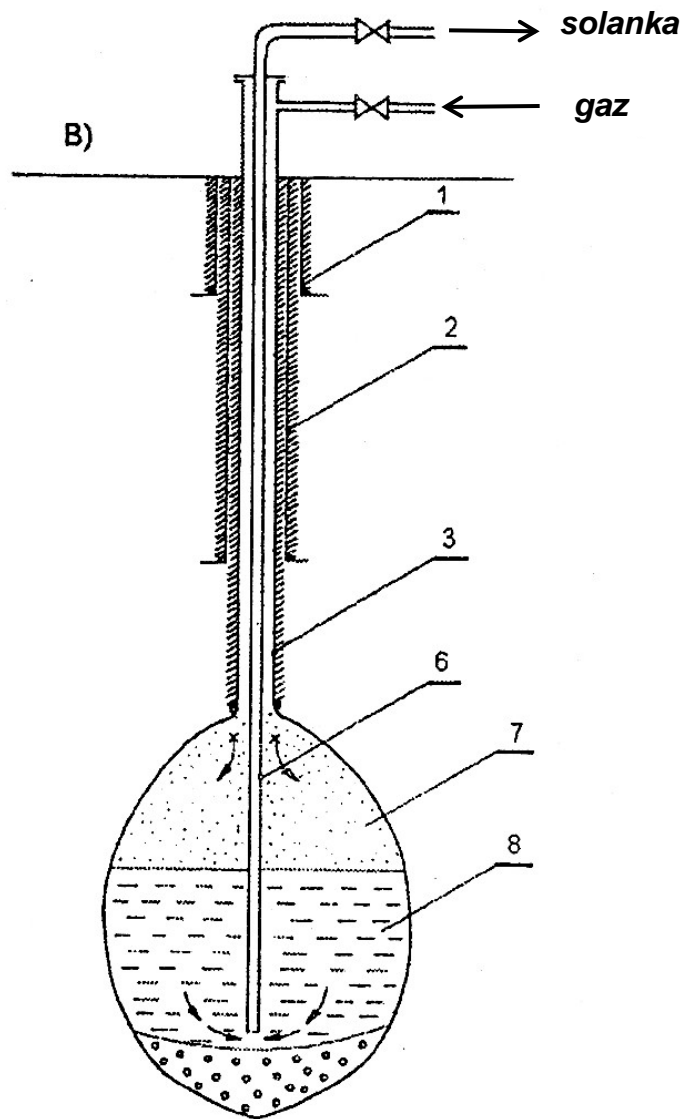
$$n_2 \cdot p_w = \gamma_{\text{śr}} \cdot H$$

n_2 – współczynnik bezpieczeństwa ze względu na szczelinowanie górotworu,

$\gamma_{\text{śr}}$ – średni ciężar objętościowy skał nadkładu,

H – głębokość stropu kawerny.

Minimalne ciśnienie niezbędne do wyparcia solanki



Po zakończeniu ługowania solankę znajdującą się w komorze wytłacza się poprzez pierwsze zatlaczanie magazynowanego medium.

Warunkiem opróżnienia komory jest wytworzenie ciśnienia p_w które pokona ciśnienie solanki w spągu komory z uwzględnieniem oporów przepływu n_3 .

Warunek opróżnienia komory przedstawia zatem wzór:

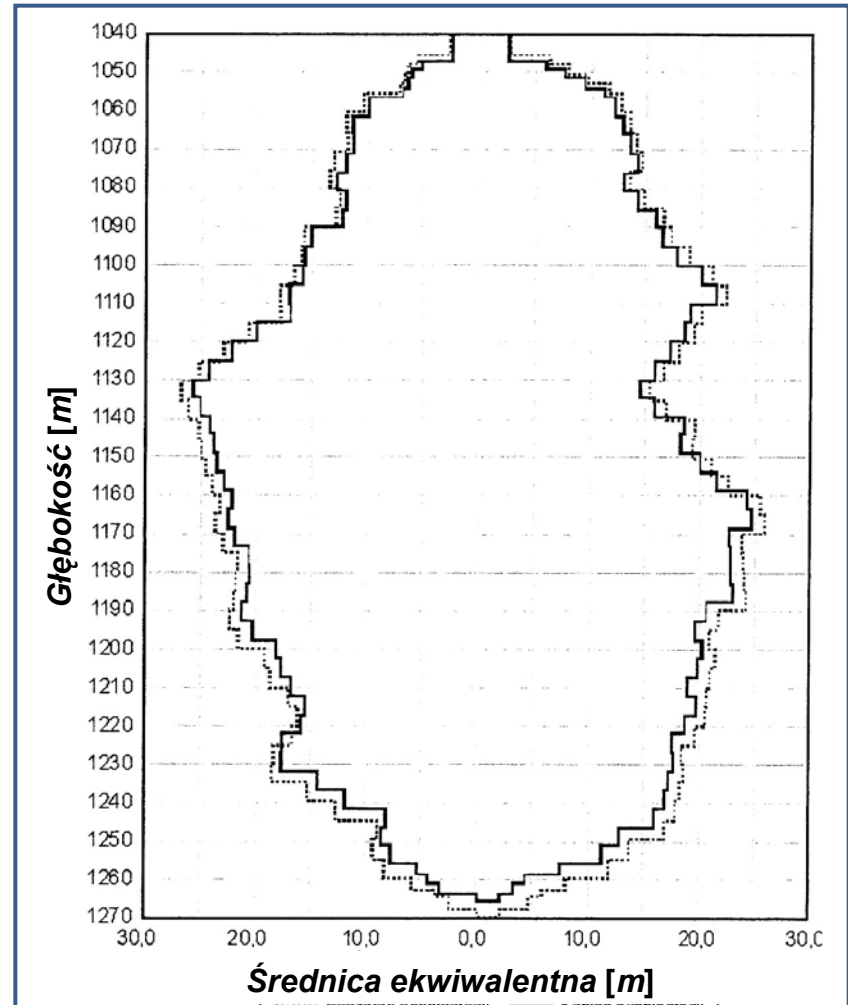
$$p_w = n_3 \gamma_0 (H + h)$$

Minimalne ciśnienie niezbędne do wyparcia solanki jest funkcją głębokości posadowienia spągu komory ($H+h$)

Konwergencja (1)

Komora magazynowa oprócz warunku naprężeniowego musi również spełniać warunek odkształceniowy celem utrzymania szybkości konwergencji w dopuszczalnych granicach.

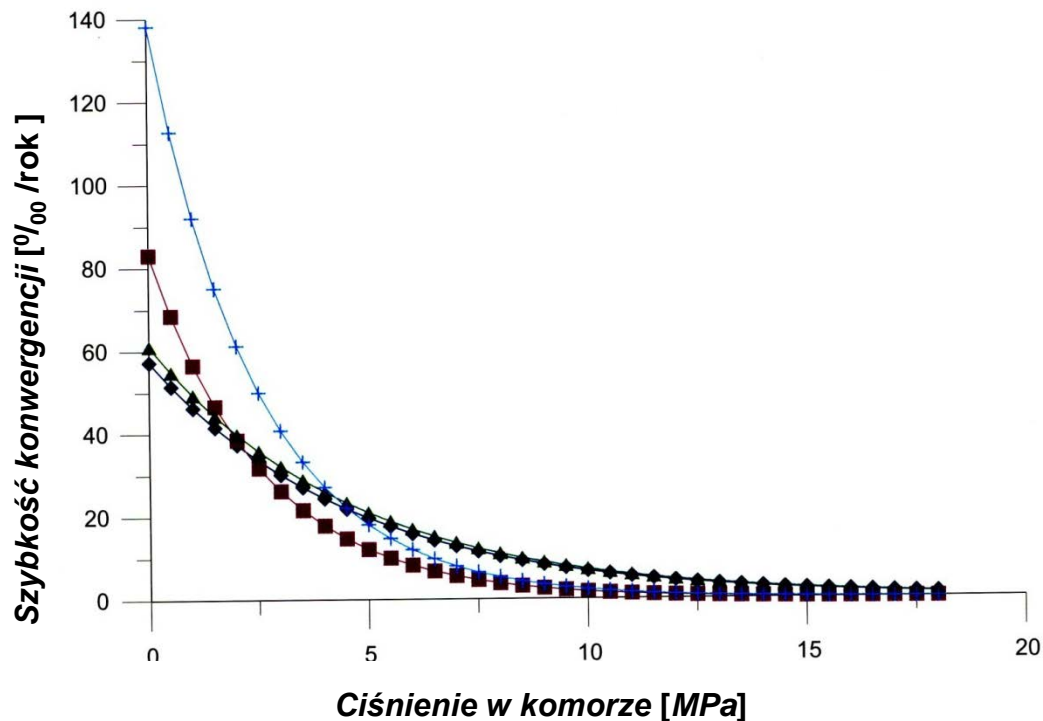
Konwergencja komory magazynowej jest zjawiskiem szkodliwym – zmniejsza objętość magazynową. Dla przykładu: przy względnej konwergencji wynoszącej 2 % objętość komory po 30 latach będzie wynosić 55 % jej objętości.



Porównanie kształtu komory magazynowej na początku i po 5 latach eksploatacji (Ślizowski 2000)

Konwergencja (2)

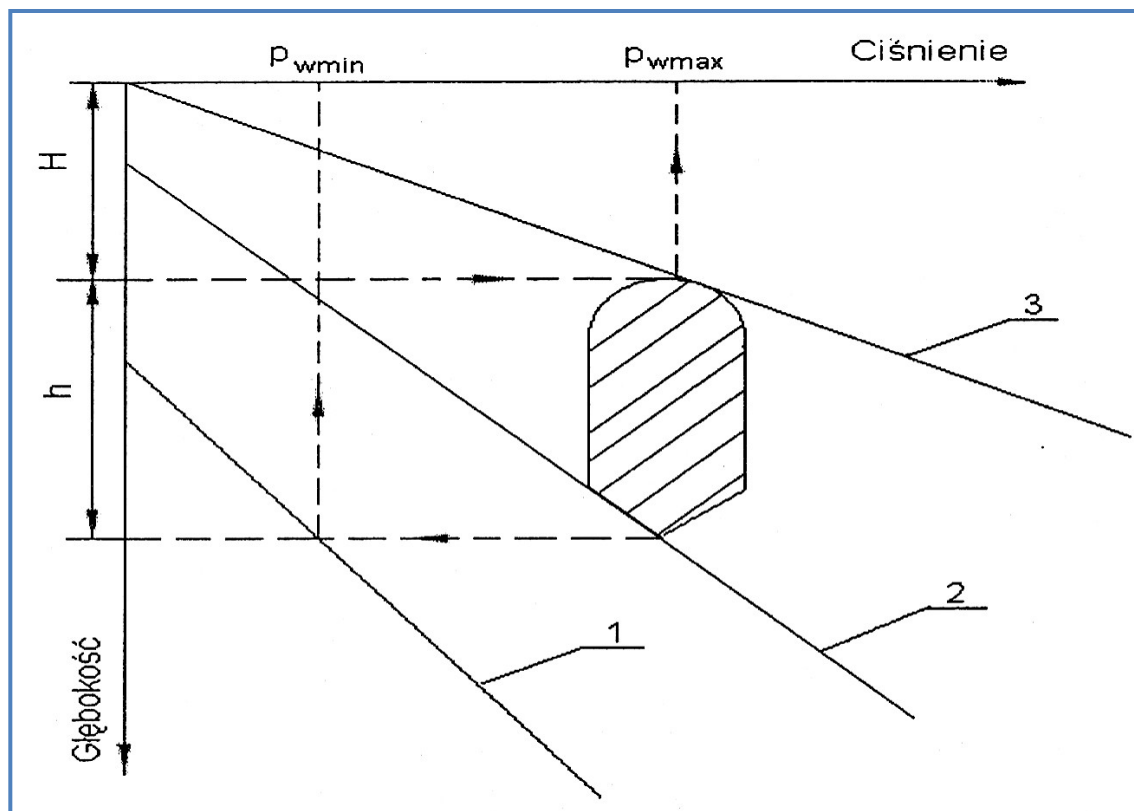
Wielkość konwergencji zależy od: średniej gęstości skał nadkładu, parametrów wytrzymałościowych i reologicznych soli głębokości stropu i wysokości komory oraz od ciśnienia magazynowanego medium.



Zależność szybkości konwergencji od ciśnienia magazynowania (Ślizowski 2000)

Wpływ ciśnienia magazynowanego medium na głębokość posadowienia stropu komory zbiornikowej i jej wysokość

Interwały posadowienia komór gazowych lokowanych w wysadach solnych są funkcją ekstremalnych wartości ciśnień magazynowanego medium.



1- warunek stateczności, 2 - warunek opróżnienia komory, 3 - warunek szczelności (Kłeczek 1989)