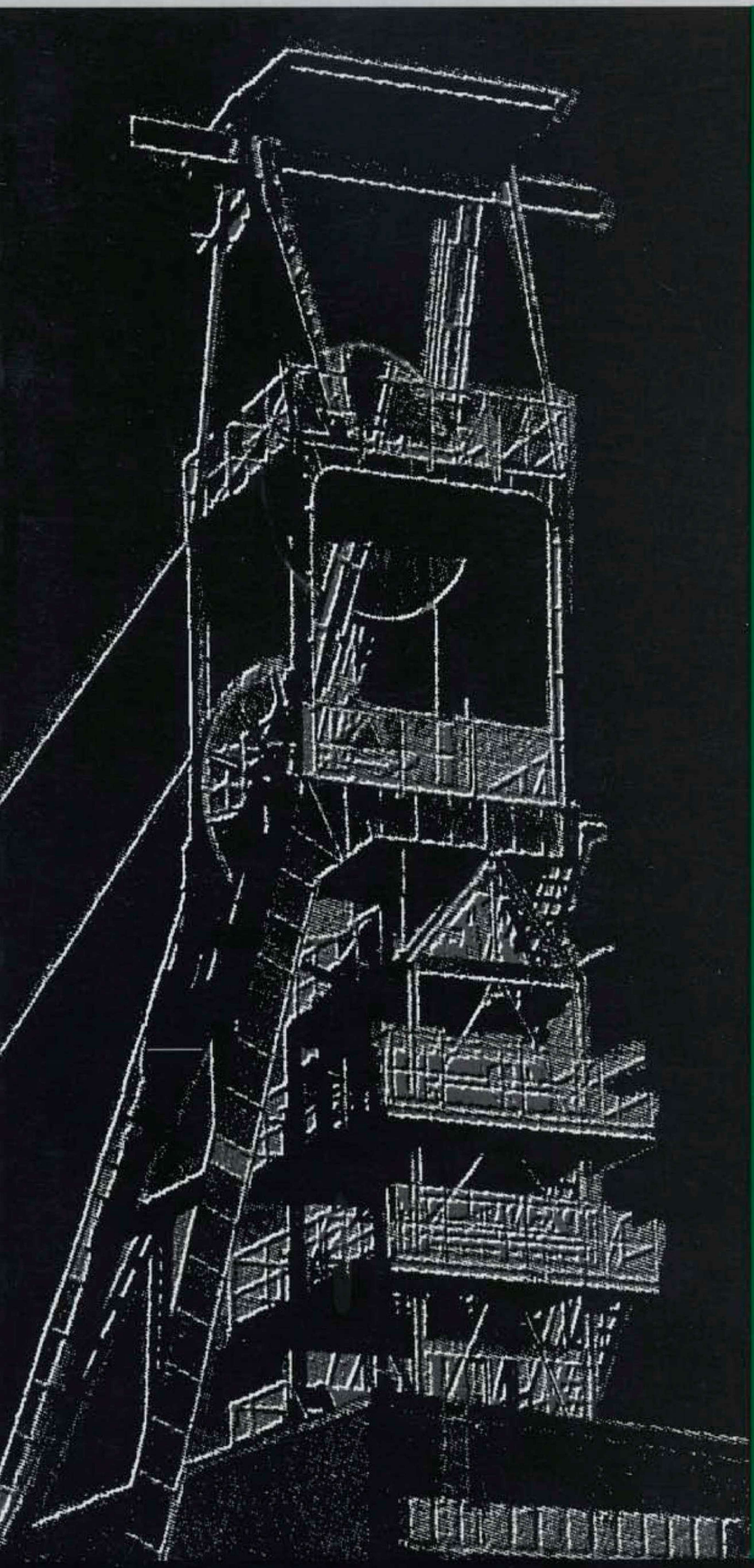
NR 6



DANUTA FLISIAK

JERZY FLISIAK

ANTONI TAJDUŚ

GEOMECHANICZNE PROBLEMY PROJEKTOWANIA PODZIEMNYCH MAGAZYNÓW SPRĘŻONEGO POWIETRZA DLA ENERGETYKI

BIBLIOTEKA SZKOŁY EKSPLOATACJI PODZIEMNEJ

Patron
Jubileuszowego wydania
Materiałów Konferencyjnych SEP
1992-2021

KGHM
POLSKA MIEDŹ

SZKOŁA EKSPLOATACJI PODZIEMNEJ

POLSKA AKADEMIA NAUK

CENTRUM PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW GOSPODARKI SUROWCAMI MINERALNYMI I ENERGIĄ

Danuta Flisiak, Jerzy Flisiak, Antoni Tajduś

Geomechaniczne problemy projektowania podziemnych magazynów sprężonego powietrza dla energetyki

Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej
Kraków 1997

RECENZENT

dr hab. inż. Maciej Mazurkiewicz, prof. AGH

ADRES REDAKCJI
31-261 Kraków, ul. J. Wybickiego 7
Komitet Organizacyjny Szkoły Eksploatacji Podziemnej
Redaktor Biblioteki
Szkoły Eksploatacji podziemnej: *Jerzy Kicki*

Redaktor techniczny: *Krzysztof Magda*

Publikacja dofinansowana przez Komitet Badań Naukowych w ramach projektu badawczego nr 9 S601 042 07 pt.: „Stateczność podziemnych zbiorników sprężonego powietrza jako element nowoczesnego systemu wytwarzania energii"

ISBN 83- 907063-6-9

Spis treści

1. Wstęp 5
2. PARAMETRY TECHNOLOGICZNE ELEKTROWNI SZCZYTOWO-AKUMULACYJNEJ Z TURBINĄ GAZOWĄ I ZBIORNIKIEM SPRĘŻONEGO POWIETRZA 7
   2.1. Parametry techniczne turbiny gazowej 7
   2.2. Charakterystyka zbiorników sprężonego powietrza 9
      2.2.1. Zbiornik powietrza o stałej objętości 9
      2.2.2. Zbiornik powietrza o zmiennej objętości 15
      2.2.3. Zbiornik sprężonego powietrza w pokładowym złożu soli 16
   2.3. Bilans przemian termodynamicznych w zbiorniku sprężonego powietrza 17
3. KRYTERIA PRZYDATNOŚCI POLSKICH ZŁÓŻ SOLI KAMIENNEJ DO BUDOWY ZBIORNIKÓW SPRĘŻONEGO POWIETRZA 22
   3.1. Kryteria geologiczno-górnicze 22
      3.1.1. Stopień rozpoznania złoża 22
      3.1.2. Objętość złoża 23
      3.1.3. Głębokość stropu i spągu złoża 23
      3.1.4. Jakość złoża 23
   3.2. Kryteria zewnętrzne 25
      3.2.1. Zasilanie w wodę do ługowania 25
      3.2.2. Zbyt solanki 26
4. PRZEGLĄD POLSKICH ZŁÓŻ SOLI KAMIENNEJ POD KĄTEM WYKORZYSTANIA ICH W ENERGETYCE 27
   4.1. Charakterystyka ogólna 27
   4.2. Złoża wysadowe 28
      4.2.1. Wysad solny Mogilno 28
      4.2.2. Wysad solny Kłodawa 31
      4.2.3. Wysad solny Góra 31
      4.2.4. Wysad solny Lubień Kujawski 34
      4.2.5. Wysad solny Łanięta 36
      4.2.6. Wysad solny Rogoźno 36
      4.2.7. Wysad solny Damasławek 36
      4.2.8. Wysad solny Izbica Kujawska 40
      4.2.9. Wysad solny Bełchatów 40
   4.3. Złoża pokładowe 43
      4.3.1. Pokładowe złoże soli kamiennej LGOM 43
      4.3.2. Złoże Chłapowo-Mieroszyno 43
      4.3.3. Złoże Rybnik-Żory-Orzesze 47
      4.3.4. Złoże soli Wieliczka 47
      4.3.5. Złoże soli Barycz 48
      4.3.6. Złoże soli Bochnia 48
      4.3.7. Złoże soli Łężkowice 49
      4.3.8. Złoże Siedlec-Moszczenica 50
   4.4. Ocena przydatności złóż soli do budowy zbiorników sprężonego powietrza 51

5. GEOMECHANICZNY MODEL GÓROTWORU SOLNEGO 54
5.1. Własności soli kamiennej w badaniach laboratoryjnych 54
5.1.1. Długotrwała wytrzymałość soli kamiennej. 54
5.1.2. Odkształcenie objętościowe jako miara zniszczenia struktury skały 55
5.1.3. Charakterystyka własności odkształceniowych soli kamiennej 58
5.1.4. Wpływ prędkości obciążania na własności wytrzymałościowe 62
5.1.5. Wpływ cyklicznego obciążania i odciążania na wytrzymałość 63
5.1.6. Wpływ temperatury na własności wytrzymałościowe 65
5.2. Doświadczalne kryterium zniszczenia górotworu solnego 67
5.3. Weryfikacja modelu soli kamiennej w warunkach in situ 71
6. STAN WYTĘŻENIA GÓROTWORU SOLNEGO W OTOCZENIU PODZIEMNYCH ZBIORNIKÓW SPRĘŻONEGO POWIETRZA 74
6.1. Wpływ kształtu zbiornika na wytężenie górotworu 74
6.2. Głębokość posadowienia zbiorników w złożu soli 78
6.3. Wpływ ciśnienia magazynowanego powietrza na wytężenie górotworu 87
7. OCENA STATECZNOŚCI CALIZN OCHRONNYCH W PODZIEMNYM MAGAZYNIE SPRĘŻONEGO POWIETRZA 88
8. METODYKA GEOMECHANICZNEGO PROJEKTOWANIA PODZIEMNYCH MAGAZYNÓW SPRĘŻONEGO POWIETRZA 91
LITERATURA 93

1. Wstęp

Prognoza rozwoju sektora energetycznego wskazuje, że zapotrzebowanie na moc szczytową w polskim systemie energetycznym pojawi się najpóźniej w 2002 roku i powinno być pokrywane przede wszystkim energią wytwarzaną przez przyjazne środowisku źródła lokalne. W poszukiwaniu alternatywnych, ekologicznych źródeł energii elektrycznej należy brać pod uwagę możliwość budowy szczytowo-akumulacyjnych elektrowni wodnych lub gazowo-powietrznych, przystosowanych technicznie do pracy pod zmiennym obciążeniem. Zadaniem tych elektrowni jest pełnienie w systemie energetycznym trzech głównych funkcji: interwencyjnej, przy awaryjnych wyłączeniach konwencjonalnych bloków energetycznych, regulacyjnej, polegającej na ciągłym wyrównywaniu zmian obciążenia sieci oraz funkcji wspomagania systemu, polegającej na pokrywaniu szybkich wzrostów zapotrzebowania na moc szczytową. Elektrownie akumulacyjne nadają się przede wszystkim, ze względu na możliwość szybkiego rozruchu, do pełnienia funkcji interwencyjnej i wspomagania. Natomiast ich rola regulacyjna jest ograniczona, ponieważ, korzystając z wcześniej zakumulowanej energii wodnej lub powietrznej, nie są przystosowane do pracy ciągłej.

O wyborze między elektrownią pompowo-wodną a powietrzno-gazową decyduje szereg względów ekonomicznych i technicznych. Możliwości lokalizacyjne elektrowni wodnych są w zasadzie ograniczone do strefy przedgórza Sudetów i Karpat. Także czas realizacji budowy, nakłady inwestycyjne i warunki podłączenia do krajowej sieci energetycznej oraz całkowita sprawność obiektu przemawiają na korzyść elektrowni gazowo-powietrznych. Charakterystyczną cechą takich elektrowni jest oddzielenie procesu sprężania powietrza od jego rozprężania oraz przesunięcie tych procesów w czasie. Osiągnięcie pełnej mocy turbiny gazowej w czasie szczytu energetycznego wymaga doprowadzenia do komory spalania znacznych ilości powietrza. W tym celu wykorzystuje się sprężone powietrze, zmagazynowane w bezpieczny sposób podczas małego zapotrzebowania na energię elektryczną. Niezbędną pojemność zbiornika, zależną od projektowanej mocy elektrowni, osiągnąć można przez zatłaczanie sprężonego powietrza do podziemnych pustek. Brane są tu pod uwagę zarówno złoża skał porowatych z natury, na przykład pozostałe po eksploatacji gazu ziemnego, jak i specjalnie wykonane pustki w skałach zwięzłych. Szczególnie preferowane są podziemne zbiorniki ługowane w złożach soli otworami z powierzchni ziemi lub udostępnione wyrobiskami podziemnymi. Argumentem przemawiającym za takim rozwiązaniem jest łatwość ługowania w górotworze solnym pustek o zadanych z góry kształtach, a także specyficzne własności geomechaniczne soli kamiennej, którą charakteryzuje zdolność do dużych odkształceń bez kruchego spękania, nawet pod działaniem dużych obciążeń, co gwarantuje zachowanie długookresowej szczelności zbiorników. Także sposób rozmieszczenia złóż soli kamiennej na terytorium Polski, a zwłaszcza ich sąsiedztwo z istniejącymi i projektowanymi liniami energetycznymi i magistralami gazowymi powoduje, że właśnie złoża solne winny być miejscem lokalizacji szczytowo-akumulacyjnych elektrowni gazowych. Ponadto solanka, otrzymana podczas ługowania podziemnych pustek, ma wartość przemysłową i może być wykorzystana gospodarczo.

Głównym problemem związanym z zapewnieniem bezawaryjnej pracy całego systemu jest zachowanie stateczności zbiorników ze sprężonym powietrzem. O stateczności zbiorników decydują cztery elementy: ich kształt i wymiary, własności wytrzymałościowe i deformacyjne górotworu, w którym wykonano zbiorniki, wymiary pozostawionych w złożu calizn ochronnych oraz warunki obciążeniowe: zewnętrzne, wynikające z głębokości lokalizacji i wewnętrzne, wynikające z wartości ciśnienia sprężonego powietrza.

Wykonanie każdego wyrobiska podziemnego zaburza pierwotny stan równowagi w górotworze i prowadzi do ustalenia się równowagi wtórnej. W geomechanice powszechnie znany jest fakt, że charakteryzuje się ona określoną koncentracją naprężeń, której wielkość i zasięg są ściśle związane z kształtem i wymiarami wykonanej pustki. Dla wielkogabarytowych wyrobisk, jakimi są zbiorniki powietrza, oznacza to konieczność doboru ich optymalnego kształtu oraz odpowiedniego zwymiarowania pozostawionych w złożu calizn ochronnych: filarów i półek, dla zachowania warunku bezpieczeństwa. W przypadku podziemnego magazynu sprężonego powietrza (PMSP) składającego się z kilku zbiorników, uwaga ta dotyczy również filarów międzykomorowych.

Rytm zapotrzebowania na moc szczytową turbiny wymusza zmiany ciśnienia we współpracującym zbiorniku w dobowym cyklu „sprężanie-rozprężanie". Oznacza to, że ściany zbiorników i otaczający je górotwór poddawane są szybko następującym zmianom obciążeń, wywołujących zmianę koncentracji naprężeń i wytężenia górotworu. Z drugiej strony zmianom ciśnienia powietrza towarzyszy zmiana jego temperatury, zgodnie z prawami termodynamiki. W ślad za tymi przemianami występuje zmienne pole temperatur w otaczającym zbiornik masywie solnym. Prognozowanie stateczności zbiorników wymaga zatem rozwiązania problemu równoczesnego wpływu cyklicznych zmian naprężeń i temperatury na przebieg charakterystyki deformacyjno-naprężeniowej oraz na postać warunku wytrzymałościowego opisującego stan równowagi granicznej soli kamiennej.

Geomechaniczne projektowanie podziemnych magazynów sprężonego powietrza budowanych w złożach soli kamiennej wymaga więc połączenia dwóch elementów:

- znajomości zachowania się masywu solnego w warunkach rzeczywistych i umiejętności jego odwzorowania na geomechanicznym modelu górotworu,
- umiejętności prognozowania stanu naprężenia w otoczeniu podziemnych budowli w złożonych warunkach geometrycznych.

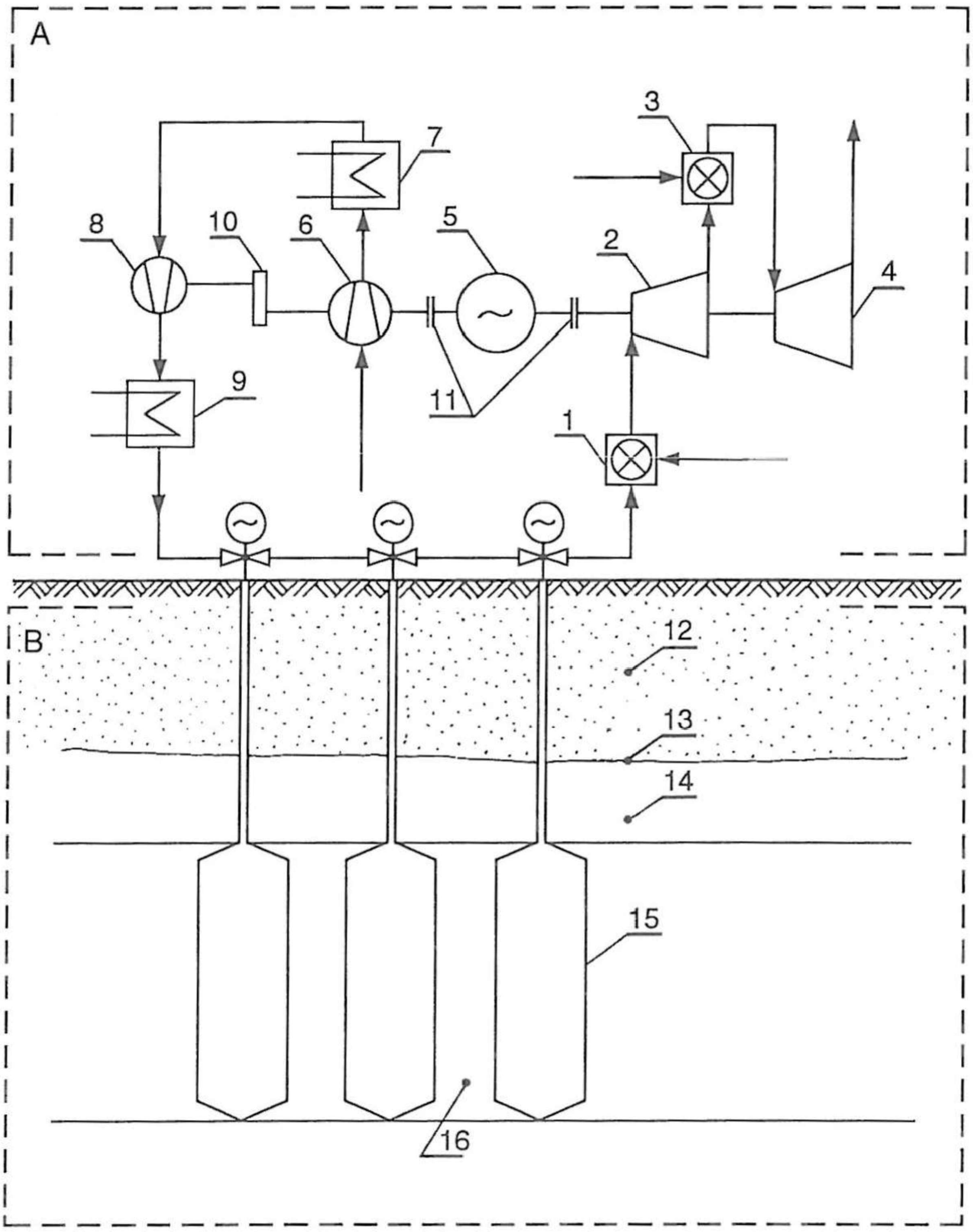
Realizacji pierwszego elementu służą odpowiednio zaprogramowane badania laboratoryjne i ich weryfikacja w warunkach naturalnych.

Do realizacji drugiego stosuje się różne techniki matematycznego modelowania, przy czym tradycyjne rozwiązania analityczne na ogół nie znajdują praktycznych zastosowań. W formułach matematycznych konieczne jest przyjmowanie wielu uproszczeń, dotyczących na przykład kształtów geometrycznych zbiorników lub niejednorodnej budowy górotworu. Stąd uzyskiwane tą drogą wyniki nie mogą być wiarygodne. Preferowanym obecnie kierunkiem jest modelowanie rzeczywistego górotworu metodami numerycznymi, które umożliwiają uwzględnienie wpływów wielu wyrobisk o dowolnych kształtach, rozmieszczonych w skomplikowanych układach geometrycznych. Zarówno dostępne metody obliczeń, jak i systematycznie doskonalona technika obliczeniowa, stwarzają szerokie możliwości dla geomechanicznego projektowania podziemnych magazynów sprężonego powietrza.

2. Parametry technologiczne elektrowni szczytowo-akumulacyjnej z turbiną gazową i zbiornikiem sprężonego powietrza

2.1. Parametry techniczne turbiny gazowej

W elektrowni szczytowo-akumulacyjnej (rys. 2.1), względnie tania energia elektryczna wykorzystywana jest do napędu silnika sprężarki powietrza w okresach małego zapotrzebowania

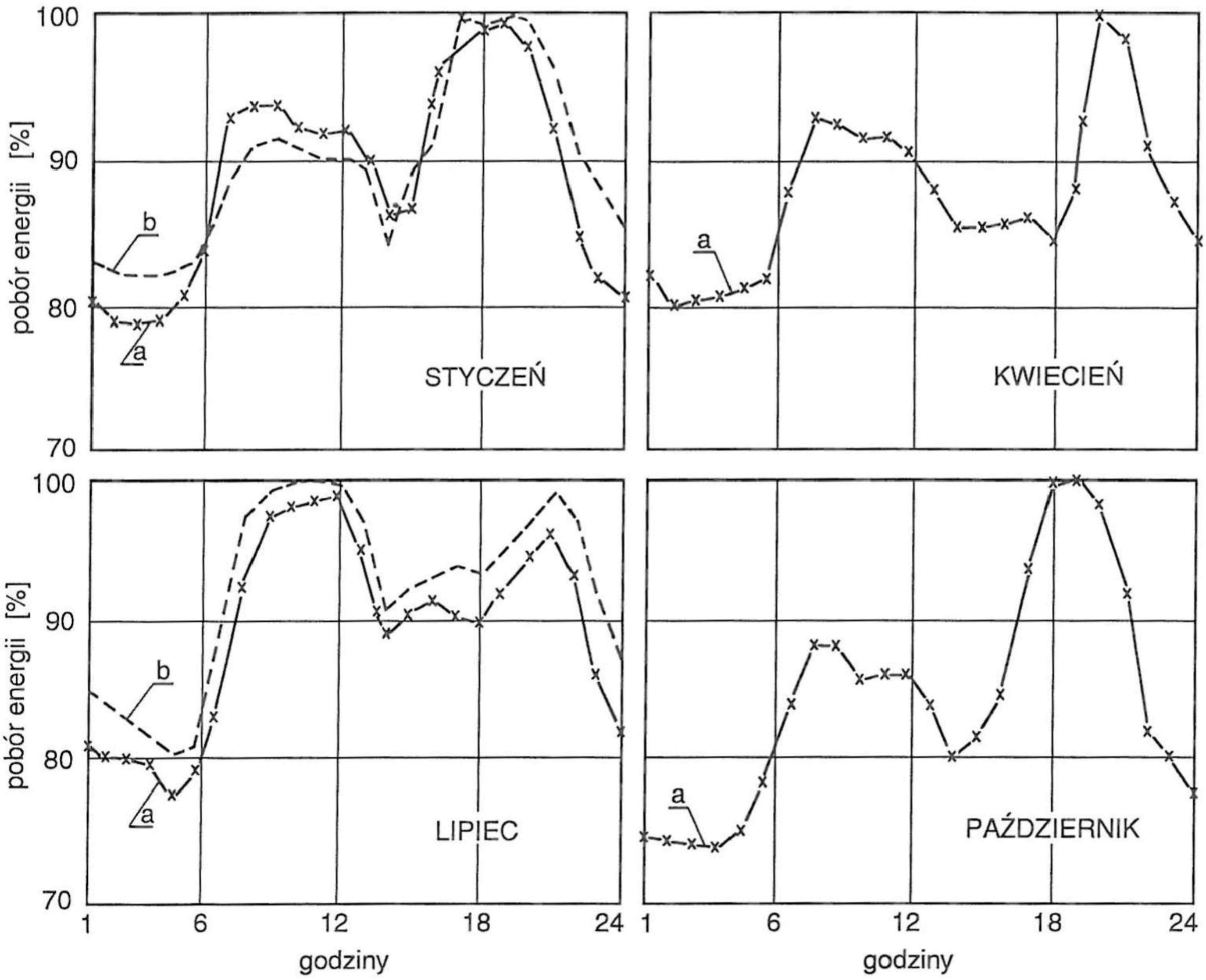


Rys. 2.1. Schemat elektrowni szczytowo-akumulacyjnej z turbiną gazową i podziemnym zbiornikiem sprężonego powietrza. A - część naziemna: 1 - komora spalania wysokiego ciśnienia, 2 - turbina wysokiego ciśnienia, 3 - komora spalania niskiego ciśnienia, 4 - turbina niskiego ciśnienia, 5 - generator, 6 - sprężarka niskiego ciśnienia, 7 - chłodnica, 8 - sprężarka wysokiego ciśnienia, 9 - chłodnica końcowa, 10 - przekładnia, 11 - sprzęgło; B - część podziemna: 12 - nadkład, 13 - zwierciadło solne, 14 - półka stropowa, 15 - zbiornik sprężonego powietrza, 16 - filar międzykomorowy

na moc w systemie energetycznym. Sprężone powietrze zostaje zmagazynowane w podziemnym zbiorniku. W czasie zapotrzebowania na energię szczytową następuje pobór powietrza w ilo-

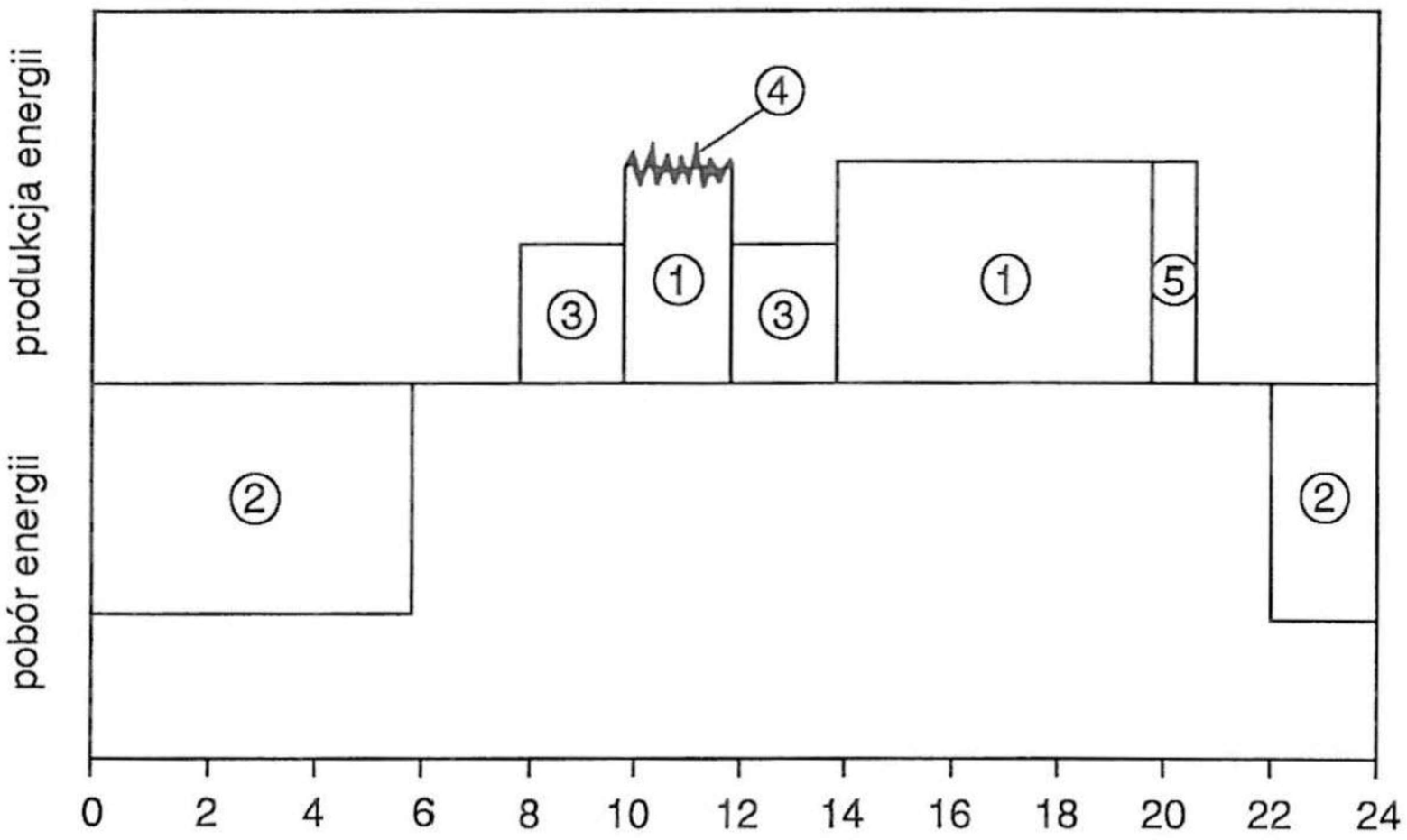
ściach niezbędnych do zapewnienia optymalnej pracy turbiny gazowej. Jest ono doprowadzane do komory spalania, a powstałe spaliny, rozprężając się w turbinie gazowej, napędzają generator prądu. Dzięki zbiornikowi powietrza uzyskuje się podstawową korzyść, jaką jest możliwość wykorzystania pełnej mocy turbiny gazowej, bowiem w układzie tradycyjnej elektrowni gazowej aż dwie trzecie wytwarzanej przez turbinę mocy jest pobierane przez sprężarkę. Walory ekonomiczne takiego rozwiązania są jeszcze większe, gdy energia do zasilania sprężarki pochodzi z elektrowni zasilanej węglem kamiennym.

Parametry techniczne całego układu, tak turbiny, jak i magazynu powietrza zależą od scenariusza zapotrzebowania systemu elektroenergetycznego na moc szczytową, to jest harmonogramu dostarczania energii i jej wielkości w cyklu sezonowym, tygodniowym i dobowym. Analiza dobowych wykresów poboru energii w dni robocze kolejnych sezonów, reprezentowanych przez cztery typowe miesiące w roku (rys. 2.2), wskazuje, że jakkolwiek rozkłady obciążeń są zróżnicowane, to dla potrzeb przeprowadzanych rozważań można przyjąć przeciętny schemat pracy turbiny (rys. 2.3). Składa się nań praca szczytowa w godzinach od 10^{00} do 12^{00} i od 14^{00} do 20^{00} oraz faza sprężania od 22^{00} do 6^{00} dnia następnego. Ponadto turbina może spełniać funkcję wspomagania, regulacyjną lub też może zaistnieć konieczność pracy interwencyjnej.



Rys. 2.2. Wykresy dobowych poborów energii w dni robocze, średnich za okres 1989 – 1993 (a) i prognozowanych na rok 2002 (b)

Z przeglądu turbozespołów, które są dostępne na rynku wynika, że elektrownia może być wyposażona w jeden lub dwa bloki o mocy od 110 do 175 MW. Większa koncentracja mocy w elektrowni szczytowej nie jest wskazana, gdyż wymagałaby nadmiernej rozbudowy sieci prze-



Rys. 2.3. Schemat dobowej pracy elektrowni szczytowo-akumulacyjnej:
1 – praca szczytowa, 2 – sprężanie powietrza, 3 – funkcja wspomagania,
4 – funkcja regulacyjna, 5 – praca interwencyjna

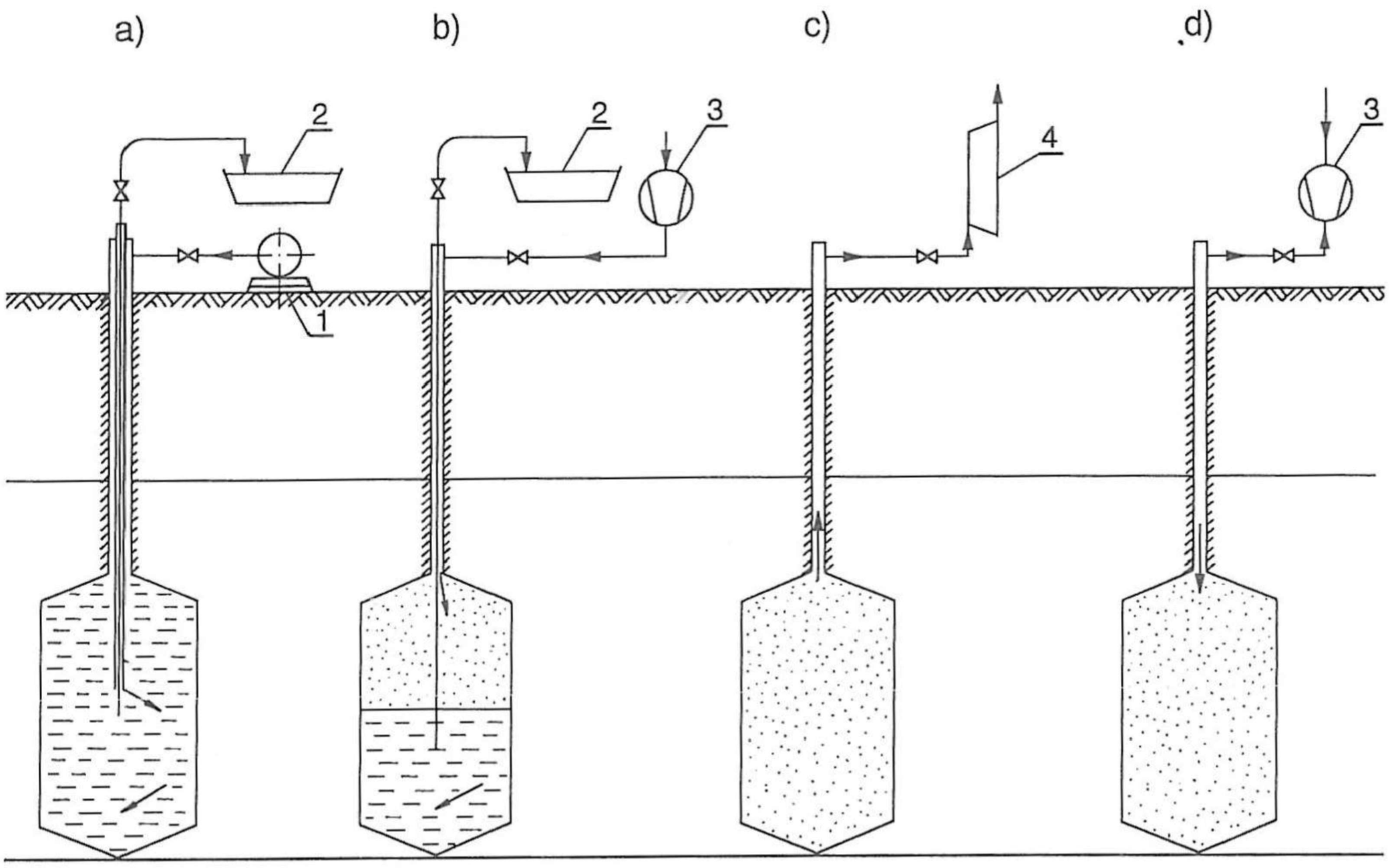
syłowej, czemu towarzyszą znaczne straty energii. Z typem konstrukcyjnym turbiny związane są dwa istotne parametry: ciśnienie dolotowe i wydatek przepływu sprężonego powietrza, które bezpośrednio determinują parametry techniczne zbiornika powietrza a mianowicie ciśnienie w jego wnętrzu oraz niezbędny, dobowy zapas sprężonego powietrza, a więc pojemność magazynu. Typowe turbiny wymagają, by wydatek przepływu sprężonego powietrza wynosił od 175 do 417 kg/s przy minimalnym ciśnieniu 5 – 6 MPa. Dopuszczalne jest przy tym krótkotrwałe obniżenie ciśnienia do 3,0 – 3,6 MPa przy awaryjnej pracy elektrowni. Oznacza to, że dobowy zapas powietrza dla jednego bloku elektrowni musi wynosić od 230 do 520 tysięcy m^3 w zależności od typu turbiny.

2.2. Charakterystyka zbiorników sprężonego powietrza

2.2.1. Zbiornik powietrza o stałej objętości

Optymalne efekty ekonomiczne kompleksu energetycznego „zbiornik powietrza – turbina gazowa" zależą przede wszystkim od właściwego dostosowania parametrów technicznych i eksploatacyjnych komory zbiornikowej do parametrów turbozespołu gazowego, przy jednoczesnym uwzględnieniu czynników geomechanicznych w aspekcie długotrwałej stateczności komory. W warunkach polskich złóż soli kamiennej podziemne zbiorniki sprężonego powietrza można wykonać w złożu o strukturze wysadowej lub w złożu pokładowym. Zależnie od przyjętej technologii mogą mieć one stałą lub zmienna objętość.

Zbiornik o stałej objętości jest zawsze wypełniony powietrzem (rys. 2.4). Opróżnianie takiego zbiornika odbywa się samoczynnie, a ciśnienie obniża się od maksymalnego do minimalnego lub granicznego. Napełnianie zbiornika odbywa się przez wtłaczanie powietrza przy użyciu sprę-

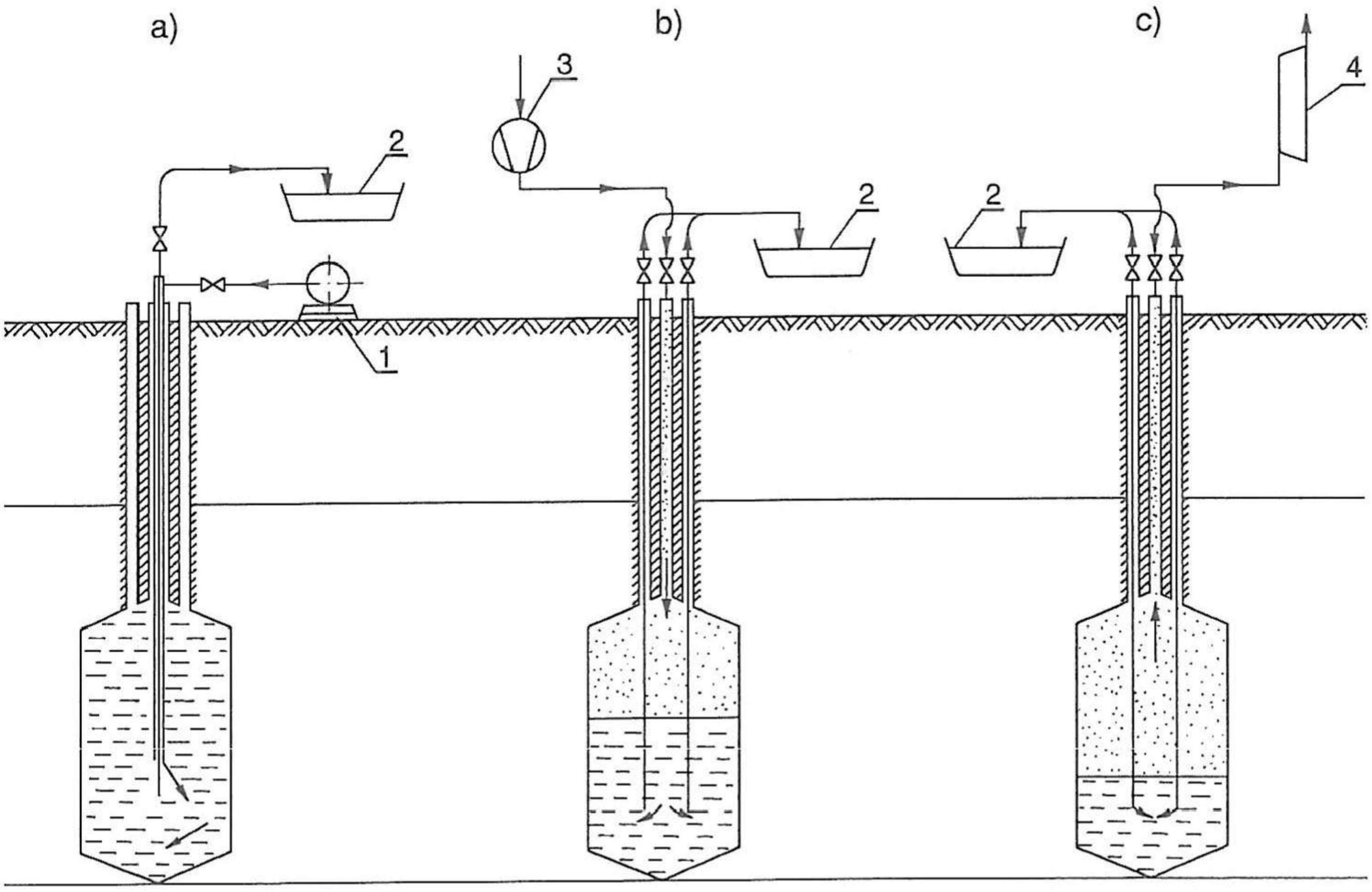


Rys. 2.4. Zbiornik powietrza o stałej objętości: a) ługowanie komory, b) pierwsze napełnianie komory powietrzem, c) pobór powietrza z komory, d) napełnianie komór powietrzem; 1 – pompownia wody, 2 – zbiornik solanki, 3 – sprężarka powietrza, 4 – turbina gazowa

żarki, przy czym jego ciśnienie wzrasta od ciśnienia minimalnego do maksymalnego. Ciśnienie maksymalne występuje w komorze przy końcu pracy sprężarkowej, gdy w magazynie jest już zgromadzony całodobowy zapas sprężonego powietrza. Ponieważ turbina gazowa pracuje przy stałym ciśnieniu, nadmiar ciśnienia sprężonego powietrza, w początkowym okresie pracy turbiny, dławiony jest w zaworze regulacyjnym. Ciśnienie minimalne występuje przy końcu pracy szczytowej, gdy zapas sprężonego powietrza, przewidziany do wykorzystania w cyklu dobowym, został już zużyty. Przy prawidłowym doborze tego ciśnienia zawór regulacyjny turbiny jest całkowicie otwarty. Niekiedy, po osiągnięciu ciśnienia minimalnego w zbiorniku, zachodzi konieczność dalszej pracy turbozespołu, np. na skutek awarii w systemie. Wówczas następuje dalsze rozprężanie powietrza aż do ciśnienia granicznego. Przyjmując, że zastosowano technologię wykonania zbiornika w złożu soli metodą ługowania otworami z powierzchni, na rysunku przedstawiono poszczególne fazy wykonania i eksploatacji zbiornika .

Zbiornik o zmiennej objętości wypełniony jest powietrzem i solanką (rys. 2.5). W czasie cyklu napełniania i opróżniania objętość zbiornika jest zmienna. Podczas napełniania zbiornika powietrze wtłaczane jest sprężarką przez otwór centralny a solanka wypierana otworami satelitarnymi do zbiornika na powierzchni. Na miejsce powietrza wprowadzana jest solanka a opróżnianie zbiornika odbywa się samoczynnie.

Dla obu rodzajów zbiorników, warunek geomechanicznej stateczności wymaga ustalenia ich parametrów geometrycznych i głębokości posadowienia. W przypadku wyboru lokalizacji w wy-



Rys. 2.5. Zbiornik powietrza o zmiennej objętości: a) ługowanie komory, b) napełnianie komory powietrzem, c) pobór powietrza z komory; 1 – pompownia wody, 2 – zbiornik solanki, 3 – sprężarka powietrza, 4 – turbina gazowa

sadowych złożach soli kamiennej, parametry te nie są uzależnione od rozprzestrzenienia złoża, bowiem występujące w Polsce wysady, przydatne do budowy zbiorników, charakteryzują się stosunkowo małą głębokością zwierciadła soli i olbrzymią miąższością (kilka tysięcy metrów). Przyjmując, że sole tworzące poszczególne struktury wysadowe wykazują znaczne podobieństwo, szczególnie w zakresie członów stratygraficznych, problem określenia wstępnych parametrów technicznych zbiorników sprężonego powietrza można rozpatrywać wspólnie dla wszystkich wytypowanych lokalizacji.

Pojemność użyteczną komory (lub komór), potrzebną do pracy jednego turbozespołu gazowego określa wyrażenie:

$$V_S = \frac{kZ}{\gamma_{2S} - \gamma_{1S}} \tag{2.1}$$

gdzie:

V_S – objętość komory, m^3
Z – dobowy zapas powietrza, kg
k – współczynnik zwiększający,
γ_{1S} – masa właściwa powietrza na początku sprężania, kg/m^3
γ_{2S} – masa właściwa powietrza na końcu sprężania, kg/m^3.

Dla potrzeb niniejszej analizy przyjęto założenie, że zbiornik powietrza będzie współpracował z typowym turbozespołem firmy Westinghouse (USA), o mocy 175 MW i następujących parametrach:

ciśnienie początkowe sprężania:	7,0 MPa,
temperatura początku sprężania:	22° C,
ciśnienie końcowe sprężania:	10,5 MPa,
temperatura końcowa:	47° C,
temperatura powietrza za chłodnicą sprężarki:	45° C,
minimalne ciśnienie w cyklu interwencyjnym:	4,2 MPa,
czas pracy szczytowej:	8 godz./doba,
czas pracy sprężarkowej:	8 godz./doba.

W praktyce przyjmuje się, że projektowana pojemność zbiornika musi być o 30 – 40 % większa od dobowego zapasu powietrza, głównie ze względu na konwergencję komory (k=1,4). Oznacza to, że niezbędna dla przyjętej turbiny, objętość początkowa zbiornika sprężonego powietrza wynosi około 230 000 m^3.

Minimalną głębokość lokalizacji stropu komory zbiornikowej w wysadowej strukturze solnej można określić uwzględniając przepuszczalność skał solnych oraz ciśnienie szczelinowania górotworu. Skała solna jest w zasadzie nieprzepuszczalna, jednak w górnych partiach wysadów solnych występują często strefy krasowe, w których odbywa się migracja wód zasolonych, połączonych z wodami nadzłożowymi. Wraz ze wzrostem głębokości zjawiska krasowe zanikają. Z doświadczeń górnictwa solnego wynika, że na głębokości większej niż 100 m poniżej zwierciadła solnego złoże soli jest nieprzepuszczalne. Strefę 100-metrową należy więc traktować jako półkę bezpieczeństwa.

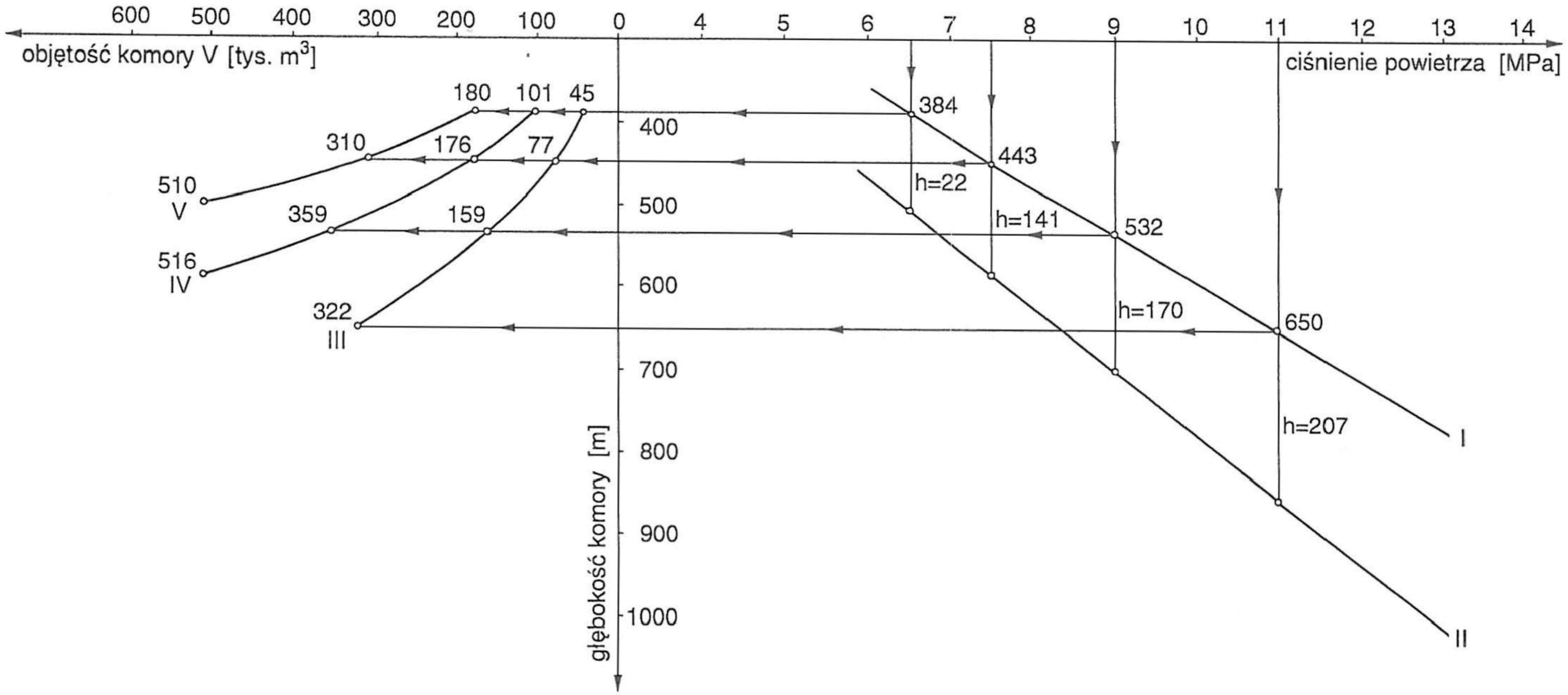
Biorąc pod uwagę głębokość zwierciadła solnego większości wysadów (Mogilno, Łanięta, Lubień Kujawski, Damasławek, Izbica Kujawska, Rogoźno i Kłodawa), wynoszącą od 300 do 550 m, głębokość dolnej powierzchni półki bezpieczeństwa, poniżej której można lokalizować strop zbiornika powietrza z uwagi na przepuszczalność soli, wynosi od 400 do 650 metrów. Aby uniknąć szczelinowania skał solnych podczas eksploatacji zbiornika, strop komory musi być tak posadowiony, aby maksymalne ciśnienie powietrza w komorze było mniejsze od wartości ciśnienia szczelinującego, uzależnionego od ciężaru skał nadległych. W praktyce górnictwa solnego warunek ten przedstawia się zależnością S. Foerstera (rys. 2.6):

$$H_{min} = \frac{\alpha p_{max}}{\gamma_n} \qquad (2.2)$$

gdzie:

H_{min} – minimalna głębokość stropu zbiornika, m
P_{max} – maksymalne ciśnienie powietrza w zbiorniku, MPa
α – współczynnik bezpieczeństwa,
γ_n – średni ciężar objętościowy skał nadległych, kN/m^3.

Z uwagi na znikomą wytrzymałość górotworu solnego na rozciąganie, ciśnienie szczelinowania, obliczone powyższą zależnością, powinno być zweryfikowane na drodze numerycznej



Rys. 2.6. Współzależność parametrów technicznych i technologicznych podziemnego zbiornika sprężonego powietrza: I - minimalna głębokość stropu zbiornika (warunek szczelinowania), II - maksymalna głębokość spągu zbiornika (warunek pierwszego napełniania powietrzem). Objętość zbiornika o kształcie elipsoidy obrotowej: o smukłości 3,0 (III); 2,0 (IV); 1,5 (V).

analizy stanu naprężenia dla konkretnego zbiornika. Dla wybranego typu turbiny gazowej o wymaganym, maksymalnym ciśnieniu powietrza w komorze wynoszącym 10,5 MPa, z zależności (2.2) wynika minimalna głębokość posadowienia stropu zbiornika, która wynosi 600 m.

Maksymalną wysokość zbiornika określić można z warunków panujących podczas wypierania solanki i pierwszego napełniania zbiornika powietrzem. W tym przypadku musi być spełniona zależność:

$$(H+h_{max})\gamma_{sol} + (H+h_{max})W_o = H\frac{\gamma_n}{\alpha} + h\gamma_p \qquad (2.3)$$

z której po przekształceniu otrzymujemy:

$$h_{max} = \frac{H\left(\frac{\gamma_n}{\alpha} - \gamma_{sol} - W_o\right)}{\gamma_{sol} - \gamma_p + W_o} \qquad (2.4)$$

gdzie:

H – głębokość stropu komory, m
γ_n – średni ciężar objętościowy skał nadległych, kN/m^3
α – współczynnik bezpieczeństwa
γ_{sol} – ciężar objętościowy solanki, kN/m^3
W_o – współczynnik spadku ciśnienia na 1 m otworu wynikający z oporów ruchu solanki, kN/m^3
γ_p – ciężar objętościowy powietrza, kN/m^3

Oznacza to, że przy przyjętej lokalizacji stropu zbiornika na głębokości 600 m i następujących wartościach liczbowych pozostałych wielkości:

$\gamma_n = 22$ kN/m^3
$\gamma_{sol} = 12$ kN/m^3
$\gamma_p = 0{,}7$ kN/m^3
$W_o = 1$ kN/m^3

oraz współczynniku bezpieczeństwa równym 1,3, wysokość zbiornika nie może przekroczyć 190 m (rys. 2.6).

Z warunków tych wynika objętość użyteczna zbiornika o założonym kształcie. Zakładając, że zbiornik ma kształt elipsoidy obrotowej o wysokości określonej zależnością (2.4), pomniejszonej o odcinek 30 m, przeznaczony na tzw. szyję komory, smukłość tej elipsoidy, mierzona stosunkiem h:d, gdzie d jest długością osi poziomej, może być przyjęta wariantowo. Powinna się ona jednak zawierać w granicach zdeterminowanych geomechaniczną statecznością, co wymaga przeprowadzenia odpowiedniej analizy. Z przedstawionych na rysunku 2.6 wykresów wynikają między innymi następujące wnioski:

– przy płytkim posadowieniu zbiornika ($H = 443$ m i $h_{max} = 141$ m), jego objętość wyniesie:
  – przy smukłości 3.0 – 77 000 m^3
  – przy smukłości 2.0 – 178 000 m^3
  – przy smukłości 1.5 – 310 000 m^3,

co oznacza, że dla współpracy z wytypowaną na wstępie turbiną, może okazać się konieczna budowa odpowiednio trzech, dwóch lub jednego zbiornika, zależnie od przyjętej smukłości.

– uzyskanie żądanej objętości magazynu wynoszącej 230 000 m^3 w pojedynczym zbiorniku, co ma uzasadnienie ekonomiczne, wymaga zastosowania komory o smukłości 3,0 i wysokości użytecznej 160 m oraz posadowienia jej stropu na głębokości minimum 600 m.

2.2.2. Zbiornik powietrza o zmiennej objętości

W zbiorniku powietrza o zmiennej objętości zalecane ciśnienie minimalne ma taką samą wartość jak w zbiorniku o stałej objętości. Natomiast wartość ciśnienia maksymalnego jest uzależniona od wysokości zbiornika i zależy proporcjonalnie od różnicy poziomów zwierciadeł solanki w zbiorniku naziemnym i w komorze podziemnej, po jej całkowitym wypełnieniu sprężonym powietrzem (rys. 2.5). Po osiągnięciu ciśnienia minimalnego zapas sprężonego powietrza jest całkowicie wyczerpany i dalsza praca turbiny nie jest możliwa.

Pojemność użyteczną zbiornika sprężonego powietrza określa zależność:

$$V_z = \frac{k_z Z}{\gamma_p} \tag{2.5}$$

gdzie:

V_Z – pojemność komory o zmiennej objętości, m^3
Z – zapas powictrza w zbiorniku, kg/dobę
k_z – współczynnik zwiększający,
γ_p – masa właściwa powietrza na końcu sprężania, kg/m^3.

Ze względu na stały przepływ solanki w zbiorniku przyjmuje się, że początkowa pojemność komory jest większa od wymaganego zapasu dobowego o 15 % ($k_z = 1.15$). W szczególności, dla wytypowanej turbiny gazowej, pojemność ta wynosi 83 000 m^3.

Ustalenie minimalnej głębokości posadowienia stropu zbiornika o zmiennej objętości, wymaga spełnienia warunku ciśnienia szczelinowania górotworu, podanego wzorem (2.1). Maksymalna wysokość zbiornika wynika z warunków panujących podczas napełniania komory powietrzem (pod koniec tej fazy) i można ją obliczyć wykorzystując równanie (2.4). W sposób analogiczny ustala się także objętość zbiorników o zmiennej pojemności, przy przyjętym z góry kształcie.

Porównanie parametrów technicznych i eksploatacyjnych zbiorników o stałej i zmiennej objętości pozwala na sprecyzowanie następujących wniosków:

– najistotniejszą różnicą, korzystną dla zbiornika o zmiennej pojemności jest znacznie mniejsza objętość wykonanej komory,
– niekorzystną cechą zbiornika o zmiennej pojemności jest konieczność wykonania aż ośmiu otworów wiertniczych, uzbrojonych w rury do spągu komory, mających służyć do odbioru i dostarczenia solanki do zbiornika,

- niekorzystna dla komory o zmiennej pojemności jest konieczność budowy powierzchniowego zbiornika solanki o objętości równej objętości podziemnej komory,
- korzystna dla zbiornika o zmiennej pojemności jest mniejsza głębokość posadowienia stropu, ze względu na wartość ciśnienie szczelinowania,
- maksymalne ciśnienie powietrza w komorze o zmiennej objętości jest niższe, jednakże w czasie napełniania komory muszą być pokonane opory przepływu solanki z komory na powierzchnię,
- pod względem funkcjonalnym korzystniejsza jest komora o stałej objętości, w której eksploatacja ogranicza się do ruchu powietrza. W komorze o zmiennej objętości w ciągłym ruchu znajduje się olbrzymia ilość solanki. Ponadto ciągłe współistnienie solanki i sprężonego powietrza może doprowadzić do zawilgocenia powietrza lub jego rozpuszczania się w solance. Oba zjawiska są kłopotliwe w obsłudze zbiornika o zmiennej objętości.

Reasumując należy uznać, że pod względem techniczno - eksploatacyjnym zbiornik sprężonego powietrza o stałej objętości jest korzystniejszy od zbiornika o zmiennej objętości. Również analiza ekonomiczna wskazuje na znaczną przewagę zbiorników o stałej objętości.

2.2.3. Zbiornik sprężonego powietrza w pokładowym złożu soli

W przypadku lokalizacji zbiornika sprężonego powietrza w złożu pokładowym, głębokość posadowienia zbiornika i jego pojemność są ściśle zdeterminowane warunkami zalegania pokładu soli kamiennej.

Analiza warunków występowania pokładowych złóż soli kamiennej w Polsce wskazuje na możliwość lokalizacji zbiornika sprężonego powietrza w złożu soli zalegającym w obszarze Lubińsko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego, w rejonie Sieroszowic lub Brzegu Głogowskiego. W rejonach tych istnieją szczególnie dogodne warunki wykonania zbiornika, polegające na możliwości wykorzystania do ługowania komór zasolonych wód odpadowych z kopalni miedzi oraz zrzutu solanki do głębokich struktur skalnych.

W polu górniczym „Sieroszowice" można spodziewać się, że strop pokładu soli o miąższości ok. 140 m zlokalizowany jest na głębokości ok. 1000 m. W okolicy Brzegu Głogowskiego strop pokładu soli o miąższości ok. 240 m zlokalizowany jest również na głębokości ok. 1000 m. W złożu tym można rozpatrywać wyłącznie budowę zbiornika sprężonego powietrza o stałej objętości. Przeprowadzona wcześniej analiza wykazała bowiem, że zbiorniki o zmiennej objętości, mają zbyt wiele wad, które ulegają znacznemu zwielokrotnieniu wraz ze wzrostem głębokości.

Zakładając zastosowanie wybranego na wstępie turbozespołu gazowego, wymagania stawiane parametrom zbiorników sprężonego powietrza należy skonfrontować z ograniczeniami wynikającymi ze względów geomechanicznych. Przyjmując, że miejscem lokalizacji zbiornika będzie rejon Brzegu Głogowskiego, strop komory może być posadowiony na głębokości nie mniejszej niż 1050 m. Analiza geomechaniczna wskazuje, że wystąpią wówczas występują następujące ograniczenia:

- ciśnienie maksymalne w zbiorniku ze względu na szczelinowanie górotworu nie może przekroczyć 17 MPa,

– minimalne ciśnienie graniczne ze względu na konieczność zachowania długotrwałej stateczności zbiornika zależy od jego kształtu i dla wariantu optymalnego nie może być mniejsze niż 5 MPa.

Wynika stąd, że podstawowy cykl pracy turbozespołu w zakresie ciśnień od 7 do 10,5 MPa jest możliwy do realizacji. Pewne problemy mogą jednak wystąpić przy pracy interwencyjnej turbozespołu, z uwagi na ograniczenie ciśnienia granicznego w zbiorniku do 5 MPa. Aby uniknąć tego ograniczenia należałoby podwyższyć zakres ciśnień roboczych turbiny.

Wysokość komory w złożach pokładowych ograniczona jest ich miąższością. Przyjmując, że miąższość złoża wynosi 240 m, grubość półki stropowej 50 m, półki spągowej 30 m a długość szyi komory 40 m, otrzymamy, że w rozpatrywanych warunkach wysokość maksymalna komory wynosić może 120 m. Wartość ta spełnia warunek stateczności określony równaniem (2.4). Dla tej wysokości objętość komory o kształcie elipsoidy obrotowej wynosi :

– przy smukłości 3.0 100 000 m^3
– przy smukłości 2.0 226 000 m^3
– przy smukłości 1.5 401 000 m^3.

Można więc stwierdzić, że istnieje możliwość uzyskania niezbędnego, dobowego zapasu powietrza, gwarantującego właściwą pracę elektrowni.

Bardzo istotne problemy mogą się pojawić przy pierwszym napełnianiu zbiorników zlokalizowanych na dużej głębokości. Operacje tą można wykonać alternatywnie:

– przez odpompowanie solanki,
– przez wyparcie solanki powietrzem.

Pierwszy sposób jest bardzo drogi i wymaga zastosowania kilkudziesięciostopniowej pompy głębinowej, którą trzeba specjalnie wykonać.

Realne jest natomiast zastosowanie drugiego sposobu. Zgodnie z wzorem (2.3) ciśnienie powietrza niezbędne do wyparcia solanki wynosi ok. 15 MPa.

Przy dużej głębokości posadowienia zbiornika, elementem rozstrzygającym o wydatku powietrza jest wymiar otworu udostępniającego komorę. Ze względów technicznych i ekonomicznych średnica tego otworu powinna być taka, aby przy określonym ciśnieniu powietrza w zbiorniku i określonej długości otworu, spadek ciśnienia między zbiornikiem a głowicą otworu w czasie poboru powietrza nie przekraczał 1 MPa.

Przeprowadzone analizy wskazują, że w rozpatrywanych warunkach, ze względu na plastyczność soli, a także na dostępne rozwiązania techniczne w zakresie otworów wiertniczych, zapewnienie odpowiedniego dla turbiny wydatku powietrza możliwe jest jedynie przez budowę dwóch zbiorników o łącznej objętości 230 000 m^3.

2.3. Bilans przemian termodynamicznych w zbiorniku sprężonego powietrza

W czasie sprężania i rozprężania powietrza w podziemnym zbiorniku zachodzą przemiany termodynamiczne o znacznym zakresie i częstotliwości, które wywierają istotny wpływ na warunki geomechaniczne określające stateczność zbiornika. Ogólnie można powiedzieć, że podczas napełniania zbiornika wzrasta ciśnienie i temperatura powietrza, natomiast opróżnianie zbiornika

związane jest z obniżeniem tych parametrów. Cykliczne zmiany zarówno ciśnienia jak i temperatury wewnątrz zbiornika przenoszą się na otaczający górotwór solny, powodując zmianę jego własności wytrzymałościowych i deformacyjnych. Tak więc dla oceny geomechanicznej stateczności podziemnego zbiornika sprężonego powietrza niezbędna jest znajomość przebiegu procesów termicznych w dobowym cyklu sprężanie-rozprężanie.

Istotnymi czynnikami umożliwiającymi dokonanie szczegółowego bilansu przemian termodynamicznych i określenie parametrów termodynamicznych w zbiorniku i na głowicy otworu są:

- sposób eksploatacji zbiornika, obejmujący długookresowy harmonogram zatłaczania i poboru powietrza oraz informacje o temperaturze i ciśnieniu powietrza na wlocie do otworu;
- własności termiczne skał wokół kawerny i otworu;
- charakterystyka techniczna zbiornika i otworu, a w szczególności głębokość usytuowania, kształt i objętość kawerny oraz średnica rury eksploatacyjnej w otworze.

Z wymienionych czynników tylko własności termiczne skał otaczających zbiornik są niezależne od działalności człowieka. Pozostałe czynniki są dobierane według potrzeb energetycznych elektrowni gazowej, przy uwzględnieniu warunków geomechanicznych zapewniających długotrwałą stateczność i szczelność zbiornika. W szczególności sposób eksploatacji zbiornika jest ściśle związany z charakterystyką elektrowni gazowej. Oznacza to, że każda podziemna kawerna na sprężone powietrze wymaga indywidualnego projektu. Dlatego też przedstawioną w niniejszym rozdziale analizę bilansu przemian termodynamicznych, przeprowadzono na konkretnym przykładzie zbiornika współpracującego z wytypowaną wcześniej turbiną gazową firmy Westinghouse o mocy 175 MW i zapotrzebowaniu powietrza w ilości 196 kg/sek. Zgodnie z wcześniejszymi rozważaniami przyjęto, że zbiornik zlokalizowany jest w górotworze solnym o znanych parametrach termicznych, na głębokości 600 m, gwarantującej zachowanie warunku szczelności. Niezbędną objętość zbiornika obliczono przy założeniu, że ilość zmagazynowanego w nim powietrza pokrywa dobowe zapotrzebowanie turbiny. Zgodnie z wzorem (2.1) otrzymano minimalną objętość równą 161 280 m^3, co przy uwzględnieniu rezerwy na konwergencję zbiornika, daje jego początkową objętość wynoszącą około 230 tys. m^3.

Jako optymalny kształt zbiornika dla projektowanej głębokości jego posadowienia, uzasadniony wcześniejszymi pracami badawczymi, przyjęto elipsoidę obrotową o stosunku wysokości do osi poziomej równym 3,0. Biorąc pod uwagę szyję komory o wysokości 30 m i przeznaczenie dolnej strefy zbiornika o wysokości ok. 7 m na części nierozpuszczalne w solance, do dalszych analiz przyjęto, że wysokość zbiornika wynosi 160 m.

Uwzględniając potrzebny wydatek powietrza podczas sprężania i rozprężania przyjęto, że średnica wewnętrzna rury eksploatacyjnej wynosi 458 mm (21").

Założono, że przebieg średnich dobowych obciążeń systemu wymaga pracy szczytowej elektrowni przez 8 godzin w ciągu doby, a pracy sprężarkowej również przez 8 godz./dobę. Rzeczywisty dobowy rozkład obciążeń może zmieniać się w szerokim zakresie. Dla potrzeb niniejszej analizy przyjęto:

- pracę szczytową (pobór powietrza) w godzinach $10^{00} - 12^{00}$ i $14^{00} - 20^{00}$,
- pracę sprężarkową (zatłaczanie powietrza) w godzinach $22^{00} - 6^{00}$.

Uwzględniając charakterystykę turbozespołu oraz wielkość strat ciśnienia pomiędzy zbiornikiem sprężonego powietrza a komorą spalania turbiny, przyjęto następujące zakresy ciśnień w zbiorniku:

- w normalnym cyklu pracy: ciśnienie maksymalne 10,5 MPa,
  ciśnienie minimalne 7,0 MPa,
- w interwencyjnym cyklu: ciśnienie maksymalne 10,5 MPa,
  ciśnienie minimalne 4,2 MPa.

Własności termiczne skał otaczających podziemny zbiornik sprężonego powietrza przyjęto zgodnie z danymi zawartymi w tabeli 2.1.

Tabela 2.1. Własności termiczne skał w miejscu lokalizacji zbiornika sprężonego powietrza

Głębokość	Rodzaj skał	Temperatura górotworu	Przewodnictwo cieplne kcal/m · godz · °C	Pojemność cieplna kcal/m^3 · °C
0 – 150	skały piaszczysto-ilaste	stopień geotermiczny 33 m/°C	1.8	400
150 – 300	skały ilasto-gipsowe	jw.	3.5	500
300 – 810	sól kamienna	jw.	4.8	440

Obliczenia stanu podziemnej kawerny podczas sprężania i rozprężania powietrza wykonano posługując się symulacją na termodynamicznym modelu komputerowym.

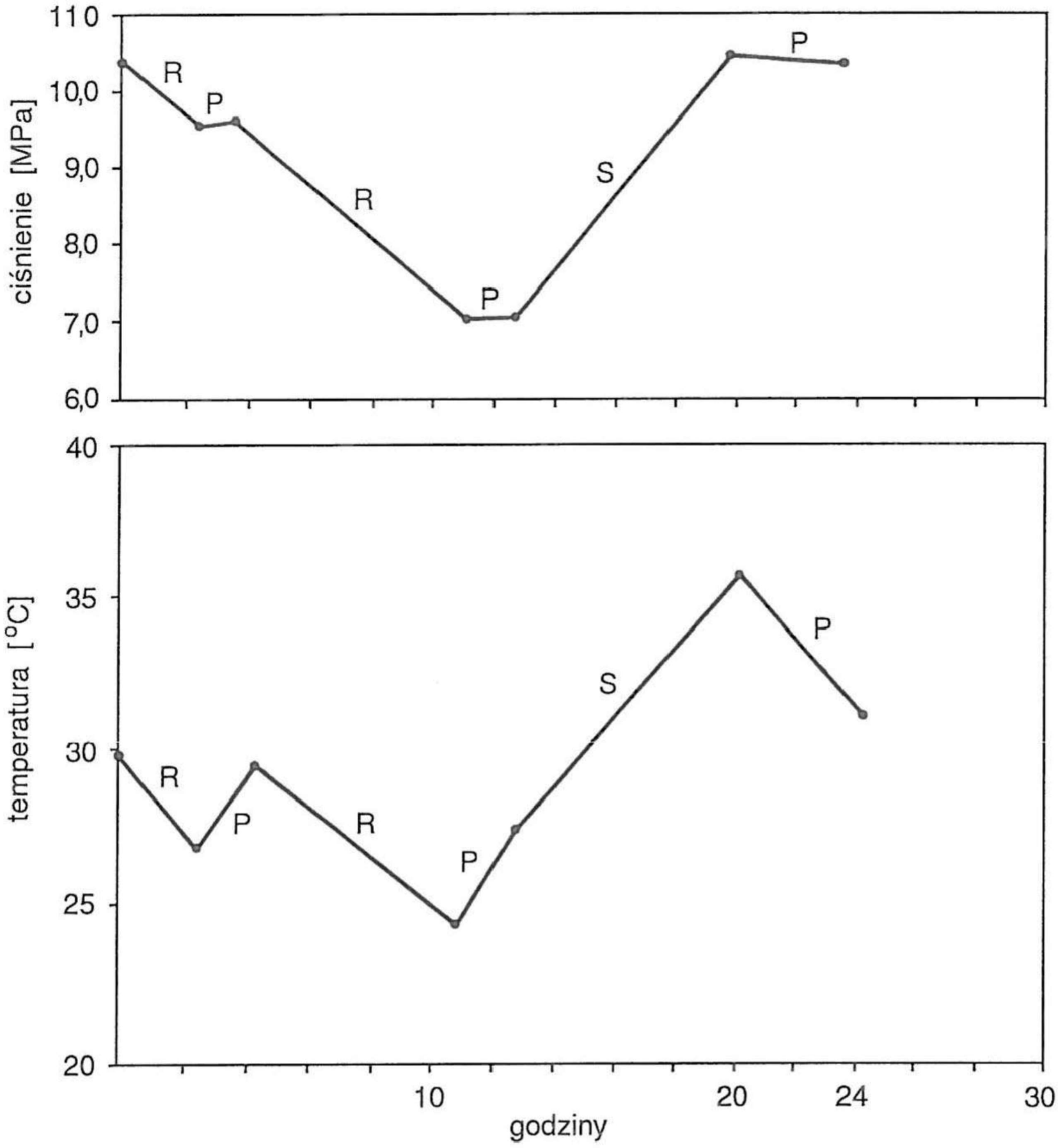
Model ten bierze pod uwagę rozprężenie się gazu w podziemnej kawernie (zachowanie masy i energii), przepływ przez rurę (zachowanie masy, energii i pędu z uwzględnieniem oporu przepływu przez rurę), wymianę ciepła między powietrzem w kawernie i w otworze a otaczającym górotworem oraz przepływ ciepła w górotworze z uwzględnieniem jego niejednorodnych własności termicznych.

Równania różniczkowe modelu aproksymowane są metodą różnicową, zaś powstałe stąd układy równań algebraicznych rozwiązywane są w programie iteracyjnie. W zastosowanej do obliczeń wersji programu KAGA [41] przyjęto dla powietrza równanie stanu gazu doskonałego. Związany z tym błąd obliczeń nie powinien przekraczać kilku procent.

Wobec braku wiarygodnych danych wartość współczynnika wymiany ciepła w kawernie i w otworze przyjęto orientacyjnie. Przeprowadzone obliczenia porównawcze z różnymi wartościami współczynników wymiany ciepła dowodzą, że ich wpływ na ciśnienie w kawernie i dopuszczalny czas pracy silnika jest niewielki, zaś wpływ na ciśnienie na głowicy nie przekracza kilku promil.

Zgodnie z przyjętymi założeniami wykonano symulację przemian termodynamicznych dla pięciu cykli dobowych. Ponadto przeprowadzono symulację cyklu interwencyjnego, najbardziej niekorzystniejszego ze względów geomechanicznych, polegającego na ciągłym, całkowitym opróżnieniu kawerny od ciśnienia maksymalnego (10,5 MPa) do ciśnienia granicznego (4,2 MPa) oraz bezpośrednim, ponownym napełnienia kawerny (z wydajnością zatłaczania 800 000 Nm^3/godz).

Wyniki obliczeń przedstawiono na wykresach.



Rys. 2.7. Przemiany termodynamiczne w zbiorniku sprężonego powietrza podczas normalnego cyklu sprężania i rozprężania: rozprężanie z wydajnością 546 tys. m^3, sprężanie z wydajnością 610 tys. m^3; R – rozprężanie, P – przerwa, S – sprężanie

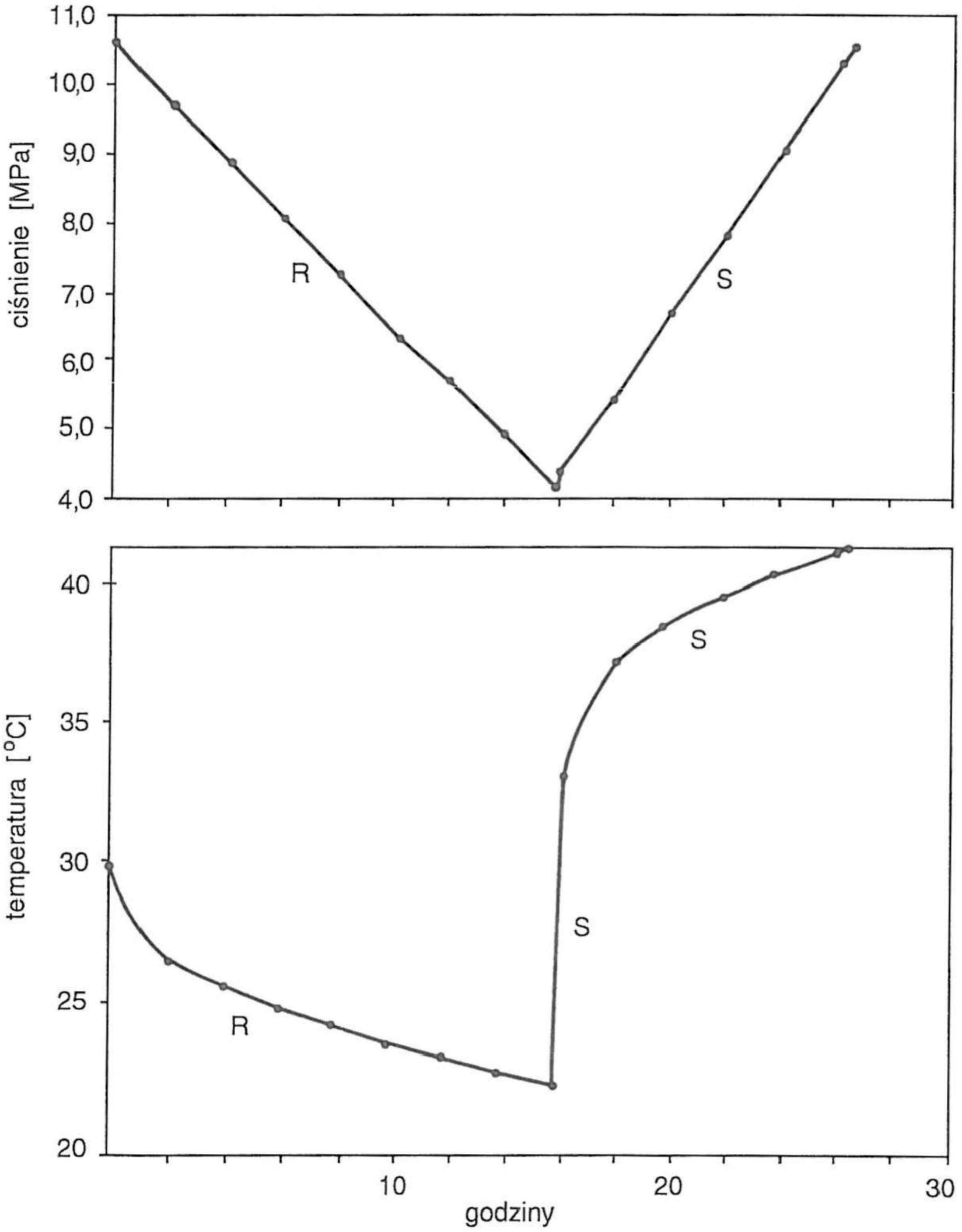
Podczas normalnego cyklu dobowego (rys. 2.7) ciśnienie w kawernie obniża się z 10,5 MPa do 7,0 MPa (pobór powietrza), a następnie wzrasta ponownie z 7,0 MPa do 10,5 MPa (napełnienie komory). Intensywność zmian ciśnienia jest najwyższa podczas napełniania zbiornika i wynosi 0,467 MPa/godz .

Temperatura powietrza w kawernie, która na początku wynosi 30°C, obniża się do 24,2°C, następnie wzrasta do 35,7°C a później oraz obniża do 31,1°C .W kolejnych, normalnych cyklach temperatura powietrza przy końcu każdego cyklu nieznacznie wzrasta, aby przy końcu piątego cyklu osiągnąć wartość 32,7°C.

W trakcie normalnego cyklu dobowego czasy trwania poszczególnych faz wynoszą:

- czas sprężania powietrza 7,4 godz.
- czas rozprężania powietrza 8,6 godz.
- czas przerw 8,0 godz.

Interwencyjny cykl sprężania i rozprężania powietrza (rys. 2.8) charakteryzuje się bardziej intensywnymi przemianami termodynamicznymi. Ciśnienie powietrza obniża się z początkowej wartości 10,5 MPa do wartości 4,2 MPa i ponownie wzrasta podczas sprężania do 10,5 MPa. Sumaryczny czas tych zmian wynosi 26,2 godz. Intensywność zmian jest największa podczas napełniania zbiornika i wynosi 0,6 MPa/godz. Temperatura powietrza w zbiorniku obniża się początkowo z 30°C do 22°C, a następnie podczas sprężania wzrasta do 41,7°C.



Rys. 2.8. Przemiany termodynamiczne w zbiorniku sprężonego powietrza podczas interwencyjnego cyklu sprężania i rozprężania: rozprężanie z wydajnością 546 tys. m^3, sprężanie z wydajnością 800 tys. m^3; R – rozprężanie, S – sprężanie

3. Kryteria przydatności polskich złóż soli kamiennej do budowy zbiorników sprężonego powietrza

Ze względu na aspekt ekonomiczny, projektowane zbiorniki na sprężone powietrze powinny spełniać obok swej zasadniczej funkcji magazynowej także funkcję eksploatacyjną w okresie budowy zbiornika, polegającą na produkcji solanki do celów przemysłowych. Wymogi funkcji magazynowej zbiornika są wysokie ze względów bezpieczeństwa i powinny być określone jako parametry techniczne pojedynczego zbiornika oraz całego pola (magazynu) zbiornikowego. Lokalizacja zbiorników musi w tym względzie zapewniać spełnienie warunku długotrwałej stateczności geomechanicznej, szczelności oraz zachowania niezbędnej objętości i zdolności do poboru i oddawania powietrza z optymalnym ciśnieniem.

Wymóg eksploatacyjny sprowadza się do tego, by uzyskiwana w procesie ługowania zbiornika solanka odpowiadała normie technicznej w zakresie minimalnej zawartości NaCl oraz maksymalnej zawartości składników ubocznych. Aby spełnić ten cel, zbiornik musi być założony w odpowiednim środowisku i ługowany odpowiednim systemem eksploatacji. W związku z tym budowa zbiorników dla potrzeb energetyki wymaga przeprowadzenia analizy przydatności złóż soli kamiennej w aspekcie produkcji i użytkowania solanki dla potrzeb przemysłowych lub też możliwości jej unieszkodliwiania.

Do wymienionego celu określono kryteria przydatności, które można ująć w następujące grupy:

- kryteria związane z warunkami geologiczno-górniczymi,
- kryteria wynikające z warunków zewnętrznych.

Druga grupa kryteriów dotyczy przede wszystkim warunków zasilania w wodę do ługowania (źródło wody, jego odległość od miejsca lokalizacji zbiornika, jakość wody) oraz zbytu solanki (odległość do miejsca użytkowania lub deponowania).

3.1. Kryteria geologiczno-górnicze

Spośród kryteriów geologiczno-górniczych, umożliwiających budowę podziemnych zbiorników sprężonego powietrza, przede wszystkim należy wymienić:

- stopień rozpoznania złoża soli kamiennej,
- objętość złoża,
- głębokość zalegania stropu i spągu złoża,
- jakość złoża.

3.1.1. Stopień rozpoznania złoża

Polskie złoża soli kamiennej, tak wysadowe jak i pokładowe są zaliczane do złóż o bardzo skomplikowanej budowie i o bardzo dużej zmienności jakości surowca. Z tego względu rozpoznanie dla celów lokalizacji zbiorników podziemnych musi być stosunkowo szczegółowe. Do celów eksploatacji otworowej wymaga się, aby złoże było rozpoznane w kategorii C1. Oznacza to

konieczność wykonania rozpoznawczych otworów wiertniczych w siatce od 1000 do 500 m. Biorąc pod uwagę specjalny charakter eksploatacji, połączony z funkcją zbiornikową, należy dążyć do stosowania ostrzejszych warunków tj. wykonania otworów w siatce 500 m. Niezależnie od dokumentowania złoża według zasad przyjętych dla ustalania zasobów eksploatacyjnych, powinny być prowadzone specjalne badania uwzględniające specyfikę zbiorników sprężonego powietrza.

3.1.2. Objętość złoża

Powierzchnia złoża i jego objętość powinny być wystarczające dla pomieszczenia planowanej liczby zbiorników sprężonego w podziemnym magazynie i pozostawionych calizn ochronnych. Uwaga ta dotyczy zarówno półek bezpieczeństwa: stropowej i spągowej, jak i filarów międzykomorowych i zewnętrznych, które są uwarunkowane względami geomechanicznymi. W praktyce górniczej przyjmuje się, ze względu na zjawiska krasowe w pobliżu czasy iłowo-gipsowej, że grubość półki stropowej nie powinna być mniejsza od 100 m. Wymiary filarów międzykomorowych muszą być określone na drodze rozważań analitycznych lub obliczeń numerycznych, przy założeniu znajomości własności wytrzymałościowych górotworu.

3.1.3. Głębokość stropu i spągu złoża

Zgodnie z rozważaniami zawartymi w poprzednim rozdziale, minimalna głębokość ostatniej zacementowanej rury w otworze musi spełniać warunek wytrzymałości górotworu ze względu na ciśnienie szczelinowania. Można stosować większe głębokości lokalizacji stropu zbiorników, ale nie jest to uzasadnione ekonomicznie. Poza tym ogranicza się w ten sposób maksymalną wysokość użyteczną zbiornika, dopuszczalną ze względu na warunek wytrzymałościowy przy pierwszym napełnianiu zbiornika powietrzem. Warunek ten nabiera szczególnego znaczenia w przypadku zamiaru budowy zbiornika sprężonego powietrza w złożu pokładowym.

3.1.4. Jakość złoża

Kryterium to ma istotne znaczenie zarówno dla funkcji zbiornikowej, ponieważ z jakością złoża wiąże się jego szczelność, jak i dla funkcji eksploatacyjnej ze względu na jakość produkowanej solanki. Szczególną uwagę należy zwrócić na;

- zawartość substancji towarzyszących soli kamiennej; zwłaszcza obecność soli o lepszej rozpuszczalności stwarza zagrożenie samoistnego i nie kontrolowanego ługowania calizn ochronnych,
- przepuszczalność złoża, wynikającą ze szczelinowatości towarzyszącej zjawiskom krasowym i porowatości wynikającej z występowania w złożu solanek i gazów,
- własności mechaniczne skały solnej, a zwłaszcza jej wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie oraz na własności deformacyjne i reologiczne.

Zawartość substancji towarzyszących

Zawartość substancji towarzyszących soli kamiennej w złożu soli ma istotny wpływ na jakość wytwarzanej podczas budowy zbiornika solanki, przeznaczanej do celów przemysłowych, a także na uzyskanie prawidłowych kształtów zbiornika i jego długotrwałą szczelność.

Ze względu na jakość solanki, zawartość substancji towarzyszących jest określona normą krajową i powinna wynosić:

– chlorek sodowy	min	96,5 %,
– substancje nierozpuszczalne w wodzie	max	1,5 %,
– wapń (Ca^{2+})	max	0,7 %,
– magnez (Mg^{2+})	max	0,1 %,
– siarczany (SO_4^{2-})	max	1,4 %,
– żelazo (w przeliczeniu na Fe_2O_3)	max	0,01%.

W praktyce ługowane są złoża o znacznie mniejszej zawartości NaCl i zwiększonej zawartości substancji nierozpuszczalnych w wodzie oraz wapnia i siarczanów bez szkody dla jakości solanki. Bowiem na zawartość tych substancji w solance wpływa także technologia ługowania, temperatura środowiska i czas kontaktu solanki ze złożem.

Inaczej należy oceniać zawartość substancji towarzyszących w aspekcie zbiornikowej funkcji kawerny. Wówczas znaczenie posiadają:

– chlorkowe sole potasowo-magnezowe (np. karnalit i sylwin) jako substancje łatwo rozpuszczalne,
– substancje bardzo trudno rozpuszczalne lub nierozpuszczalne (np. anhydryt, polihalit, iłowiec, piasek).

Uciążliwość substancji łatwo rozpuszczalnych zależna jest od formy ich występowania. Substancje rozproszone nie są szkodliwe, natomiast zdecydowanie niekorzystne jest ich występowanie w postaci ciągłych przewarstwień, nawet cienkich. Ulegają one intensywnemu ługowaniu, nawet nasyconą solanką, powodując powstawanie szczelin, niejednokrotnie o znacznym zasięgu. Takie zjawisko dyskwalifikuje komorę jako zbiornik sprężonego powietrza, istnieje bowiem możliwość kontaktu z sąsiednimi komorami lub skałami przepuszczalnymi.

Podobnie przedstawia się zagadnienie substancji trudno rozpuszczalnych i nierozpuszczalnych. W postaci rozproszonej w złożu nie stwarzają trudności w ługowaniu komory, osiadając na jej dnie i zmniejszając jedynie pojemność użyteczną zbiornika. Niekorzystne dla funkcji zbiornikowej są przewarstwienia ciągłe, które uniemożliwiają ługowanie komory w żądanym kierunku, powodując jej deformację.

Własności mechaniczne skały solnej

Własności te są szczególnie ważne do spełnienia funkcji zbiornika sprężonego powietrza. Dla zachowania długotrwałej stateczności wielkogabarytowych pustek, wypełnionych powietrzem o często zmieniającym się ciśnieniu, konieczna jest duża wytrzymałość soli i ograniczona plastyczność. Istotne są także jej własności reologiczne, które w niekorzystnym przypadku mogą doprowadzić zbyt szybko do utraty funkcjonalności zbiornika przez nadmierną konwergencję.

Przydatność górotworu solnego do magazynowania sprężonego powietrza powinna być ustalona na drodze odpowiednich badań laboratoryjnych prób pobranych z rdzeni wiertniczych w miejscu projektowanej lokalizacji zbiornika.

Przepuszczalność soli

Funkcja zbiornikowa komory wymaga, aby skała solna była nieprzepuszczalna. Sól kamienna jest ośrodkiem plastycznym, więc jest na ogół nieprzepuszczalna. Jednakże są sytuacje, gdy tą własność może utracić. Górne strefy złóż soli: w przypadku pokładów – partie sąsiadujące z nadległymi warstwami skał płonych, w przypadku złóż wysadowych – górne strefy wysadu, do kilkudziesięciu metrów poniżej czapy gipsowej, są często porowate w wyniku długotrwałego działania krasowego wód podziemnych. Takie zjawiska krasowe występują przede wszystkim na kontakcie soli kamiennej i soli potasowo-magnezowych lub sztywnych przewarstwień anhydrytu, przy silnych zaburzeniach tektonicznych. Przyczyną porowatości soli kamiennej, a więc i jej przepuszczalności, może być także naturalne występowanie w złożu ługów pometamorficznych.

Przepuszczalność soli powinna być ustalona w badaniach „in situ" w miejscu projektowanej lokalizacji zbiornika. W praktyce górniczej przyjmuje się, że zbiorniki należy posadawiać na takiej głębokości, by półka ochronna między czapa gipsową a ostatnią zacementowaną rurą otworu wiertniczego miała grubość co najmniej 100 m. Poniżej tej głębokości złoże solne jest traktowane jako nieprzepuszczalne, ponieważ ewentualne strefy soli porowatej mają ograniczony zasięg.

3.2. Kryteria zewnętrzne

Wykonanie zbiornika sprężonego powietrza w złożu soli metodą ługowania podziemnej pustki otworami z powierzchni ziemi, uzależnione jest od warunków zewnętrznych obejmujących:

- możliwość doprowadzenia wody do ługowania,
- możliwość zbytu solanki.

3.2.1. Zasilanie w wodę do ługowania

Woda przeznaczona do ługowania zbiorników powinna pod względem jakości odpowiadać normom wody pitnej. Jest to warunek obligatoryjny, jeśli solanka wytworzona podczas ługowania zbiornika ma być użyta do produkcji soli spożywczej. W przypadku zastosowania solanki do celów przemysłowych, jakość wody powinna uwzględniać wymagania technologiczne konkretnego procesu przemysłowego.

Wydatek źródła wody jest istotnym czynnikiem, wpływającym na harmonogram ługowania zbiornika, który z kolei zależy od wielu czynników technicznych oraz od możliwości zbytu solanki. Parametry te mają bezpośredni wpływ na czas wykonania zbiornika, a więc i efektywność ekonomiczną przedsięwzięcia.

Przy ocenie przydatności złoża soli do ulokowania w nim zbiorników na sprężone powietrze, należy także oceniać odległość złoża od źródła wody.

3.2.2. Zbyt solanki

Względy ekonomiczne i ekologiczne powodują, że podstawowym warunkiem ługowania zbiorników jest sposób zagospodarowania solanki. Istnieją tutaj dwie możliwości: zrzut solanki do naturalnych zbiorników, w których nie naruszy ona równowagi ekologicznej, lub jej utylizacja.

Zrzut solanki jest możliwy, gdy w pobliżu lokalizacji elektrowni szczytowo-gazowej występują odpowiednie zbiorniki wodne (morze) lub podziemne porowate struktury skalne, na przykład wyeksploatowane złoża gazu ziemnego.

W przypadku zastosowania solanki do potrzeb przemysłowych, musi mieć ona odpowiedni skład mineralny i odpowiednie stężenie soli NaCl. Aby spełnić warunek stężenia przemysłowego w granicach 300 – 310 g/dcm^3, możliwe są dwa rozwiązania:

- ługowanie zbiorników z pozyskiwaniem solanki nienasyconej i dosycanie jej w innych komorach ługowniczych o charakterze eksploatacyjnym,
- ługowanie zbiorników z zastosowaniem technologii, która pozwala uzyskać solankę nasyconą.

W sytuacji braku blisko zlokalizowanych komór eksploatacyjnych, druga możliwość jest jedynym rozwiązaniem, co jednak znacznie wydłuża czas budowy zbiornika.

Tak więc, przy ocenie przydatności złoża soli kamiennej do budowy zbiorników sprężonego powietrza, należy również mieć na uwadze strategię zbytu solanki, a także drogę jej transportu.

4. Przegląd polskich złóż soli kamiennej pod kątem wykorzystania ich w energetyce

4.1. Charakterystyka ogólna

Na terytorium Polski występują dwie formacje solonośne: cechsztyńska i mioceńska. Dominującą jest formacja cechsztyńska, która na przeważającym obszarze zalega na głębokości od 3 do 5 tysięcy metrów. Ma ona charakter pokładu o miąższości od 100 do 300 m i ze względu na dużą głębokość, w obecnych warunkach nie przedstawia wartości przemysłowej. W trzech rejonach strop złoża zalega nie głębiej niż 1000 m, to jest w Polsce Centralnej, we wschodniej części Pomorza oraz na monoklinie przedsudeckiej.

Na Pomorzu Wschodnim, w rejonie wyniesienia Łeby (złoże Chłapowo-Mieroszyno) oraz w strefie przedsudeckiej (złoże Lubińsko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego) utwory soli tworzą prawie poziomo zalegające pokłady o zróżnicowanych, ale też i znacznych, dochodzących do 150 m miąższościach i głębokościach dostępnych do działalności górniczej (800 – 1200 m). Ze względu na lokalizację, oba złoża mogą być miejscem budowy podziemnych magazynów sprężonego powietrza, pod warunkiem szczegółowego rozpoznania ich budowy geologicznej.

W Polsce Centralnej, w niektórych miejscach pokładu, wskutek zjawiska halokinezy nastąpiło silne wyniesienie masywu solnego ku powierzchni Ziemi, tworząc tzw. wysady solne. Są to skupienia skał solnych, których strop zalega na głębokości od 200 do 500 m pod powierzchnią terenu, a spąg sięga głębokości kilku tysięcy metrów. Głównym obszarem występowania struktur wysadowych są Kujawy. Udokumentowano także płytko zalegający wysad, zlokalizowany na terenie województwa piotrkowskiego, rozdzielający dwa skrzydła złoża węgla brunatnego: Szczerców i Bełchatów oraz stwierdzono występowanie zwierciadła solnego wysadów Goleniów i Drawno w trakcie głębokich wierceń poszukiwawczych za ropą naftową i gazem ziemnym w obszarze synklinorium szczecińskiego.

Pole powierzchni wysadów w rzucie poziomym jest zróżnicowane i wynosi od kilku do kilkudziesięciu kilometrów kwadratowych. Wewnętrzna struktura wysadów solnych jest niejednorodna. W masywie skał solnych występuje zarówno sól kamienna, jak i łatwo rozpuszczalne sole potasowo-magnezowe oraz nierozpuszczalne warstwy anhydrytu i iłowców. Usytuowanie tych utworów w wysadzie jest nieregularne, a ich lokalizacja metodami geofizycznymi jest niemożliwa. Występowaniu wysadów często towarzyszą zjawiska krasowe w postaci pustek, niejednokrotnie o znacznych rozmiarach, zlokalizowanych w czapach gipsowych i górnych partiach utworów solnych. Jednocześnie, w wyniku szczegółowych prac geologiczno-rozpoznawczych w wysadach można wyodrębnić duże skupiska stosunkowo czystej soli kamiennej i towarzyszące im zjawiska krasowe o ograniczonym zasięgu.

W aspekcie możliwości lokalizacji zbiorników na sprężone powietrze w rejonie Środkowej Polski znanych jest 11 wysadów solnych, rozpoznanych w różnym stopniu. Trzy z nich: „Wapno", „Inowrocław" i część środkowa wysadu „Kłodawa" są objęte działalnością górniczą w taki sposób, że ich wykorzystanie w celu budowy podziemnego magazynu sprężonego powietrza nie jest możliwe. Wysady „Góra" i „Mogilno" są obecnie eksploatowane, natomiast pozostałe: „Łanięta", „Lubień Kujawski", „Rogoźno", „Damasławek", „Izbica Kujawska", „Bełchatów"

oraz północna i południowa część wysadu „Kłodawa" nie zostały dotychczas zagospodarowane i mogą stanowić przedmiot zainteresowania dla energetyki.

Mioceńska formacja solonośna występuje na dużym obszarze Podkarpacia, od Śląska po wschodnią granicę Polski. Jednakże na skutek ruchów górotwórczych Karpat jest ona silnie zaburzona tektonicznie i częściowo przykryta utworami fliszowymi, w związku z czym złoża soli kamiennej występują jedynie na niewielkich obszarach przy brzegu nasunięcia karpackiego. W silnie spiętrzonych fałdach zaznaczyły się wyprasowania lub też pogrubienia fałdów. Zjawiska te, towarzyszące znacznemu wyniesieniu fałdów ku powierzchni spowodowały, że nad serią pokładów soli kamiennej zalega płytkie złoże bryłowe, obecnie prawie zupełnie wyeksploatowane. Największą regularnością charakteryzuje się złoże Rybnik-Żory-Orzesze. Jednakże ze względu na obecność w tym rejonie kopalń węgla kamiennego, pozostaje ono w zasięgu wpływów eksploatacji i nie może być objęte działalnością górniczą.

Pozostałe złoża mioceńskiej soli kamiennej: Wieliczka, Bochnia, Barycz, Moszczenica, Siedlec i Łężkowice są objęte działalnością górniczą w takim zakresie, że budowa w nich podziemnych magazynów gazu jest wykluczona. Pewne możliwości lokalizacyjne istnieją w obrębie złoża Siedlec, w obszarze likwidowanej obecnie kopalni soli Siedlec-Moszczenica.

Ogólna charakterystyka geologiczna złóż soli kamiennej wskazuje na ich znaczne zróżnicowanie pod względem wielkości i kształtu, głębokości zalegania oraz struktury. Zatem istnieje konieczność dokonania szczegółowej analizy budowy każdego z nich.

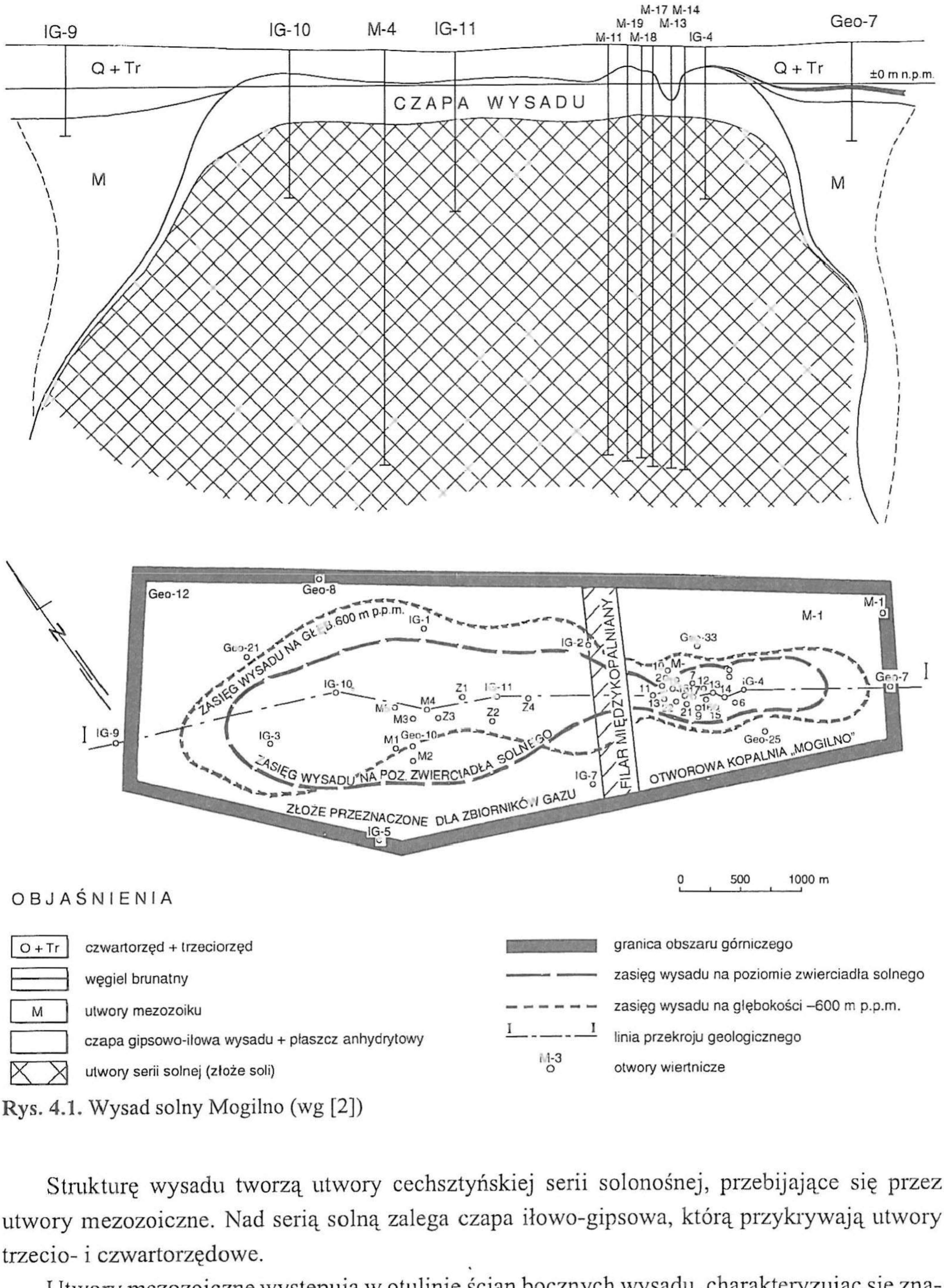
4.2. Złoża wysadowe

4.2.1. Wysad solny Mogilno

Wysad Mogilno znajduje się w województwie bydgoskim, na terenie gmin Mogilno i Rogoźno. Teren nad wysadem jest równinny i mało zróżnicowany pod względem morfologicznym. Jedynie w części wschodniej istnieją niewielkie wzniesienia o charakterze morenowym. Dla hydrografii tego rejonu mają znaczenie dwa bezodpływowe jeziora: Długie i Wieśniata, położone nad północno-zachodnim krańcem wysadu. Pozostałe drobne cieki powierzchniowe mają charakter okresowy.

Wysad wchodzi w skład antyklinorium kujawsko-pomorskiego i zalega w północno-zachodniej, brzeżnej części niecki mogileńsko-łódzkiej, gdzie zaznacza się antyklinalne wypiętrzenie utworów mezozoicznych i ma kształt kopuły nieregularnie wydłużonej w kierunku NWW-SEE (rys. 4.1). Dłuższa oś wysadu ma około 5 km, a jego szerokość wynosi od 350 m w części południowo-wschodniej do 600 m w części północno-zachodniej.

Wysad jest zagospodarowany górniczo: w południowo-wschodniej części prowadzona jest otworowa eksploatacja soli kamiennej, pozostała część tworzy obszar górniczy, na którym trwa budowa podziemnego magazynu gazu. W związku z tym liczne otwory wiertnicze, badawcze i eksploatacyjne, przewiercające utwory solne, pozwoliły na szczegółowe udokumentowanie wysadu



Rys. 4.1. Wysad solny Mogilno (wg [2])

Strukturę wysadu tworzą utwory cechsztyńskiej serii solonośnej, przebijające się przez utwory mezozoiczne. Nad serią solną zalega czapa iłowo-gipsowa, którą przykrywają utwory trzecio- i czwartorzędowe.

Utwory mezozoiczne występują w otulinie ścian bocznych wysadu, charakteryzując się znacznym upadem warstw i licznymi spękaniami. Są reprezentowane przez utwory triasu i jury. Trias występuje w postaci ceglasto-wiśniowych, często plamistych iłowców i mułowców, wapnistych i dolomitycznych, z licznymi wtrąceniami gipsu i anhydrytu. Jura wykształcona jest jako

formacja ilasto-piaskowcowa. W jej skład wchodzą naprzemianległe warstwy szarego lub zielonkawego iłowca i piaskowca o spoiwie ilasto-marglistym, zawierającego blaszki muskowitu i gniazda pirytu. Młodsze utwory jurajskie występują w postaci szarych, marglistych wapieni z wkładkami margli.

Utwory kenozoiczne występują w nadkładzie wysadu, ponad jego czapą oraz na obrzeżach czapy i wysadu. Wydzielić w nich można utwory należące do trzecio- i czwartorzędu. W niektórych rejonach nad wysadem trzeciorzęd uległ redukcji i ponad czapą iłowo-gipsową zalegają bezpośrednio utwory czwartorzędowe. W pozostałych rejonach na utwory trzeciorzędowe składają się głównie mułowce lub zailone piaskowce o charakterystycznym zielony zabarwieniu, niekiedy z ziarnami glaukonitu (oligocen), piaski kwarcowe i mułowce ilaste z wkładkami węgla brunatnego (miocen) oraz zielonooliwkowe pstre iły z przewarstwieniami piasków, mułowców i węgla brunatnego (pliocen). Czwartorzęd wykształcony jest w formie plejstoceńskich utworów polodowcowych: piasków, żwirów i glin oraz holoceńskich utworów aluwialnych i zastoiskowych.

Bezpośrednio nad zwierciadłem solnym wysadu zalega czapa iłowo-gipsowa, która jest utworem residualnym, powstałym w wyniku ługowania przez wody podziemne górnej części wysadu, podczas jego formowania się. W centralnej części wysadu miąższość czapy wynosi około 100 m. Zależnie od rodzajów soli, które uległy rozługowaniu, czapa ma charakter iłowo-gipsowo-anhydrytowej lub gipsowo-anhydrytowej. W obrębie czapy gipsowo-anhydrytowej, zalegającej nad solami czystymi, występują utwory krasowe, co ma istotne znaczenie dla uszczelnienia otworów wiertniczych.

Zwierciadło solne wysadu zalega na głębokości od 240 do 260 m pod powierzchnią terenu i na prawie całym obszarze jest płaskie. Na obrzeżach wysadu zwierciadło gwałtownie zapada, tworząc strome ściany. Ściany mają liczne przewieszki, co zostało stwierdzone otworami wiertniczymi kunturującymi wysad. Seria solna występuje w postaci utworów soli starszych (Z2), młodszych (Z3) i najmłodszych (Z4). Budowa wewnętrzna wysadu ma skomplikowany tektonicznie charakter, typowy dla struktur wysadowych o wydłużonej osi podłużnej. Poszczególne warstwy solne zalegają bardzo stromo, kąt upadu waha się od 700 do 900 i często jest pionowy.

Sole kamienne w wysadzie należą do soli czystych i w przeważającej większości nadają się do ługowania otworami z powierzchni. Lokalizację komór podziemnych mogą utrudniać występujące miejscami grubsze przewarstwienia anhydrytowe oraz pojawiające się w obrębie soli młodszych i najmłodszych warstwy soli potasowo-magnezowych. Różniące się własnościami ługowniczymi sole potasowo-magnezowe stwarzają zagrożenie utratą szczelności komory lub wysadu. Ilość części nierozpuszczalnych w solach, poza solą zubrową, jest niewielka i nie ma istotnego wpływu na proces ługowania.

Istniejący stan zagospodarowania wysadu stwarza bardzo dobre warunki dla lokalizacji w jego wschodniej części brzeżnej podziemnego magazynu powietrza dla elektrowni szczytowej, pracującej na bazie dostaw z podziemnego magazynu gazu.

4.2.2. Wysad solny Kłodawa

Wysadowe złoże Kłodawa jest integralną częścią większego elementu tektonicznego, którym jest struktura solna Izbica Kujawska-Łęczyca (rys.4.2). Ciągnie się ona na długości około 63 km. Z niej przebijają się dwa wysady: w części północnej Izbica Kujawska i Kłodawa w części środkowej. Wysad kłodawski jest największy z odkrytych dotychczas w Polsce. W rzucie poziomym ma kształt wydłużony w kierunku północny zachód-południowy wschód. Jego długość wynosi około 26 km, a maksymalna wysokość około 2 km. W przekroju pionowym tworzy pień o wysokości ok. 7 km, przechylony w górnej części w kierunku południowo-zachodnim. Do jego ścian południowo-wschodnich przylegają utwory triasu i jury, zaś do południowo-zachodnich - jedynie utwory jurajskie. Wysad jest przykryty trzecio- i czwartorzędem. Czapa iłowo-gipsowa o przeciętnej grubości od 100 do 150 m, przechodzi na ścianach bocznych w płaszcz iłowo-gipsowo-anhydrytowy. Zwierciadło solne zalega na głębokości od 100 do 350 m i jest urozmaicone morfologicznie.

W profilu pionowym złoże składa się z szeregu warstw serii solnej: sole kamienne lokalnie z wkładkami soli potasowo-magnezowych, anhydryty, zubry, iły i iłowce solne. Zdecydowaną przewagę w całym profilu wykazuje kompleks soli kamiennych wraz z przerostami serii potasonośnej. Sumaryczna miąższość tej serii wynosi około 850 m. W budowie wewnętrznej przeważa skomplikowana tektonika z następującymi elementami: łuskową antykliną brzeżną w części północno-wschodniej, głęboką synkliną w części środkowej wysadu oraz masywną antykliną południowo-zachodnią.

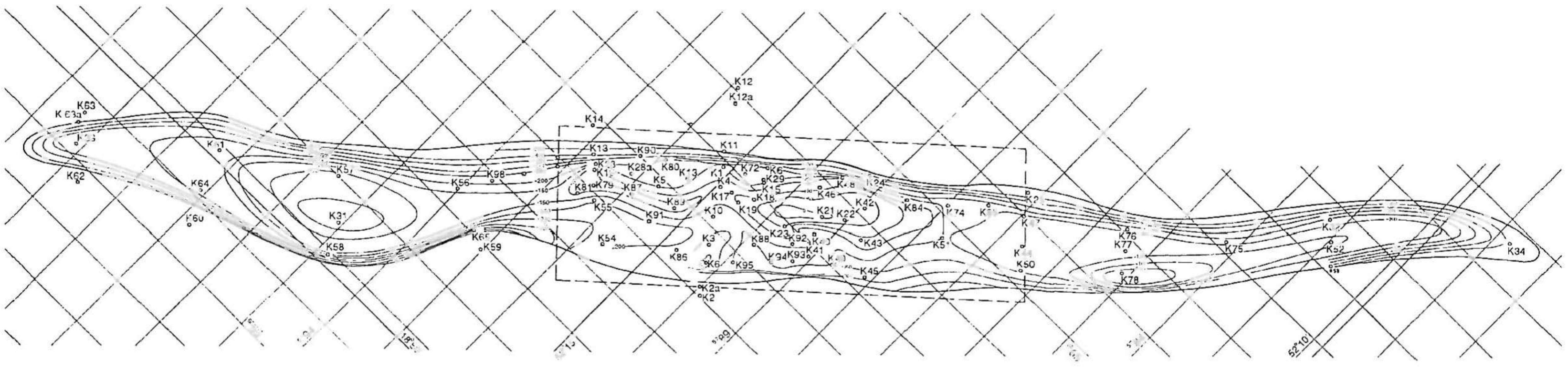
W nadkładzie wysadu występują wodonośne utwory trzecio- i czwartorzędowe, z których woda może migrować do czapy gipsowo-iłowej. Potencjalnymi nosicielami wody wewnątrz wysadu mogą być stromo ułożone warstwy anhydrytu lub soli porowatych i jamistych. Najczęściej występującym gazem jest metan, który związany jest ze strefami zaburzeń tektonicznych, zwłaszcza w obrębie zubrów i soli ilastych. W północno-wschodniej części eksploatowanej partii wysadu występują wyrzuty gazu, połączone z wyrzutami pokruszonych skał solnych.

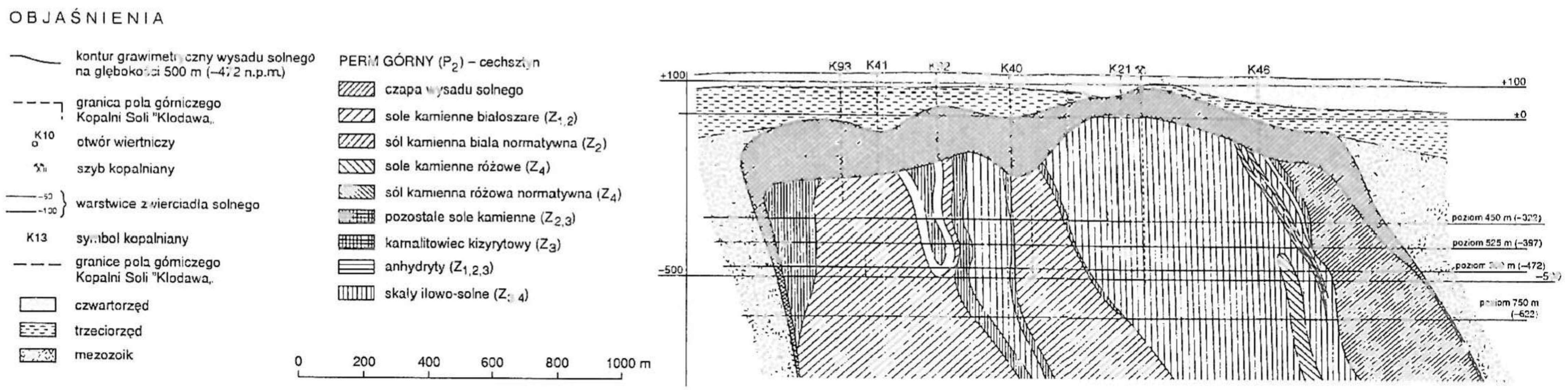
Środkowa część wysadu w obrębie synkliny objęta jest eksploatacją górniczą w taki sposób, że posadowienie w niej podziemnego magazynu gazu nie jest możliwe. Natomiast istnieją takie możliwości w części północno-wschodniej i południowo-zachodniej po szczegółowym rozpoznaniu struktury wewnętrznej wysadu w miejscu lokalizacji zbiorników.

4.2.3. Wysad solny Góra

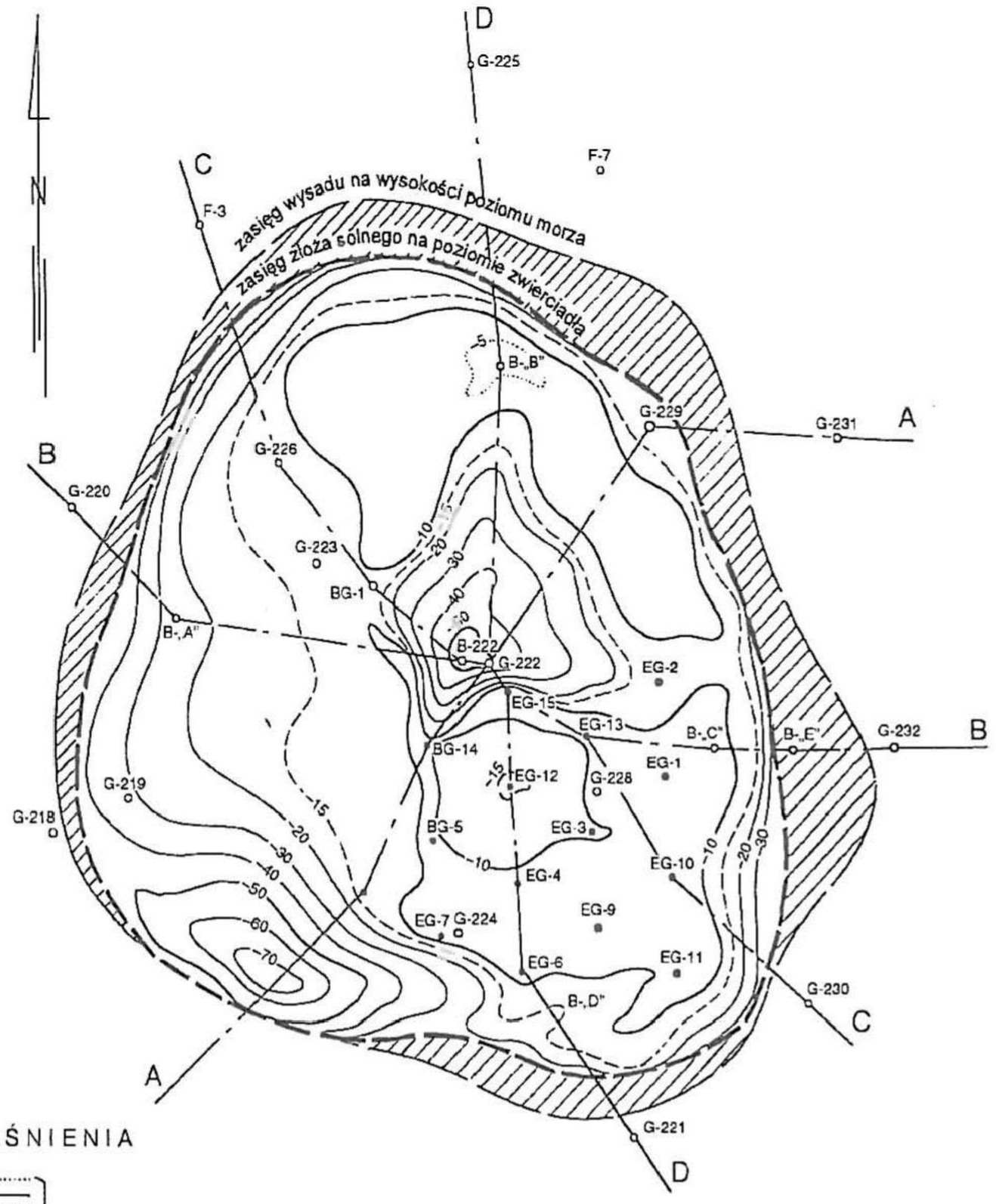
Wysad zlokalizowany jest w środkowym odcinku ciągu struktur solnych Kłodawa - Barcin, tylko częściowo przebijających się przez mezozoik i jest integralną częścią większej struktury, która ma kształt mocno wydłużony w kierunku północny zachód - południowy wschód (4.3). Stanowi znaczne wyniesienie w jej brzeżnej, najdalej na północny zachód wysuniętej części, co wyraźnie zaznacza się w morfologii terenu ok. 9 km na południowy wschód od Inowrocławia.

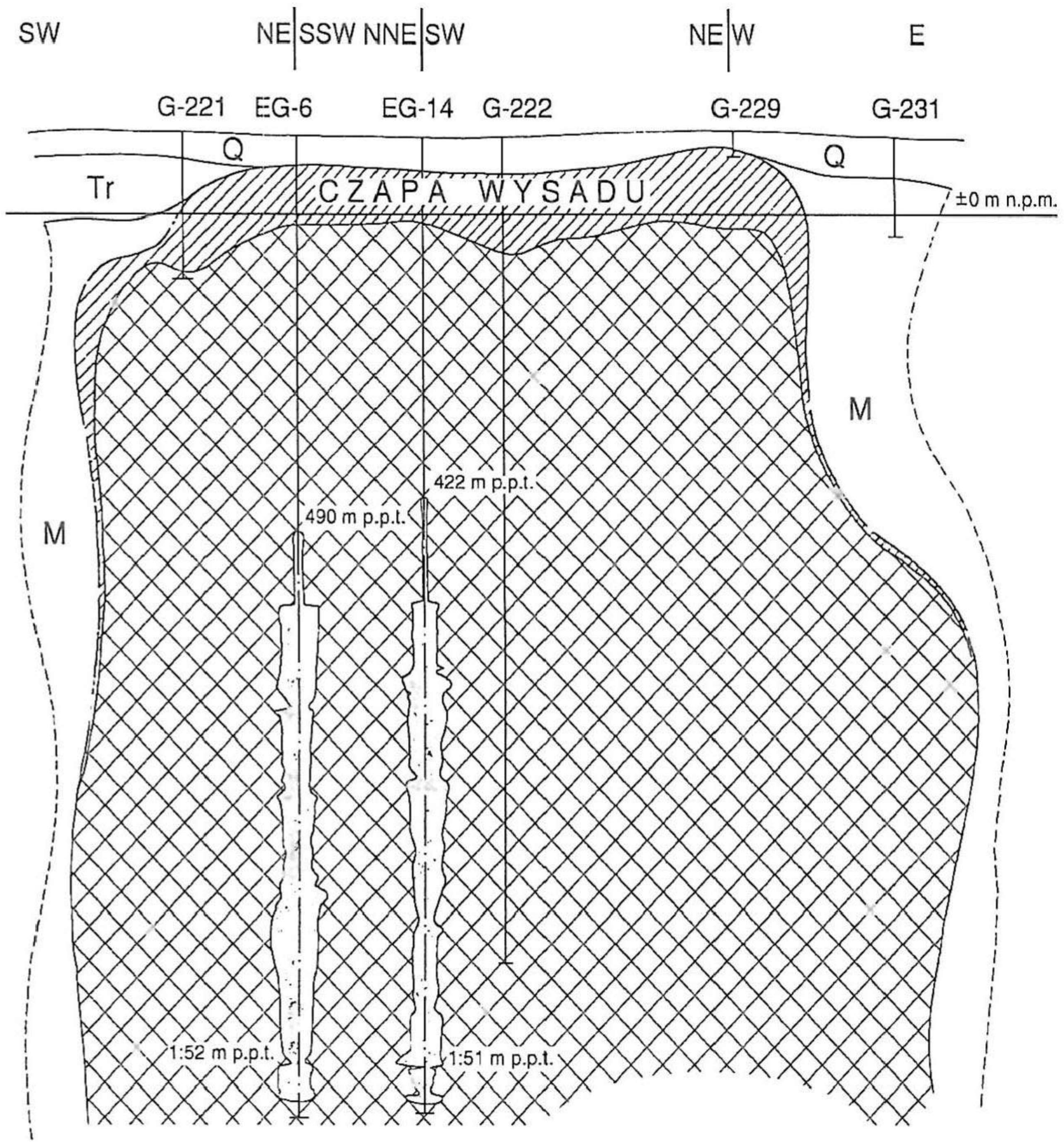
W przekroju poziomym wysad jest nieforemną elipsą o dłuższej osi zgodnej z ogólnym kierunkiem zalegania struktur solnych. Jej długość wynosi około 1000 m, a szerokość 750 m.





Rys. 4.2. Wysad solny Kłodawa (wg [1])





Rys. 4.3. Wysad solny Góra (wg [1])

W przekroju pionowym wysad ma kształt kopuły, która przebija się całkowicie przez otaczające go utwory mezozoiku i trzeciorzędu. Zachodnia i północna ściana wysadu zapadają stromo, natomiast południowa i wschodnia - łagodnie, co powoduje poszerzenie wysadu wraz z głębokością.

Czapa wysadu ma znacznie zróżnicowaną morfologicznie powierzchnię i zalega na głębokości od 19 do 70 m. Jej grubość waha się od 34 do 69 m. Generalnie zbudowana jest z gipsu, z niewielkimi domieszkami lub wkładkami iłów, przy czym w kierunku poziomym zaznacza się wyraźne zróżnicowanie litologiczne. W części północnej wysadu jest to czapa iłowa, w części środkowej i południowej - gipsowa. Oba typy przechodzą w pobliżu zwierciadła solnego w anhydryt.

Zwierciadło solne zalega na głębokości od 101 do 172 m. Powierzchnia jest zróżnicowana morfologicznie w niewielkim stopniu, a deniwelacje nie przekraczają 8 m. Strukturę wewnętrzną wysadu tworzą głównie utwory cyklotemu PZ2, PZ3 i PZ4. Utwory cyklotemu PZ3 i PZ4 są przeważnie ilaste i zubrowe, niekiedy mają postać soli kamiennej różowej z przerostami soli potasowo-magnezowych. Utwory te tworzą wychodnie na powierzchni zwierciadła solnego w środkowej i północnej części wysadu. Natomiast południową część wysadu budują utwory cyklotemu PZ2, w obrębie którego występuje jednorodna sól kamienna starsza, grubo- i średnioziarnista, biała lub szara, w niewielkim stopniu uwarstwiona anhydrytem. Posiadane informacje z rdzeni wiertniczych wskazują na skomplikowaną tektonikę wewnętrzną wysadu. Strome upady warstw i powtarzające się serie solne wskazują na fałdowy charakter zaburzeń. Cechę tą potwierdzają również nieregularne kształty komór eksploatacyjnych, konturowanych echosondą.

Stopień rozpoznania warunków hydrogeologicznych jest niezadowalający Należy spodziewać się poziomów wodonośnych w obrębie trzecio- i czwartorzędu oraz wapieni i dolomitów jurajskich. Możliwe jest występowanie solanek w skrasowiałych partiach czapy wysadu.

Wysad jest eksploatowany otworami z powierzchni w przedziale głębokości od 400 do 1200 m, przy czym wymiary i kształt wyrobisk są zróżnicowane i znacznie odbiegają od zaprojektowanych. Niemniej istnieją możliwości wskazania lokalizacji dla budowy zbiorników na sprężone powietrze.

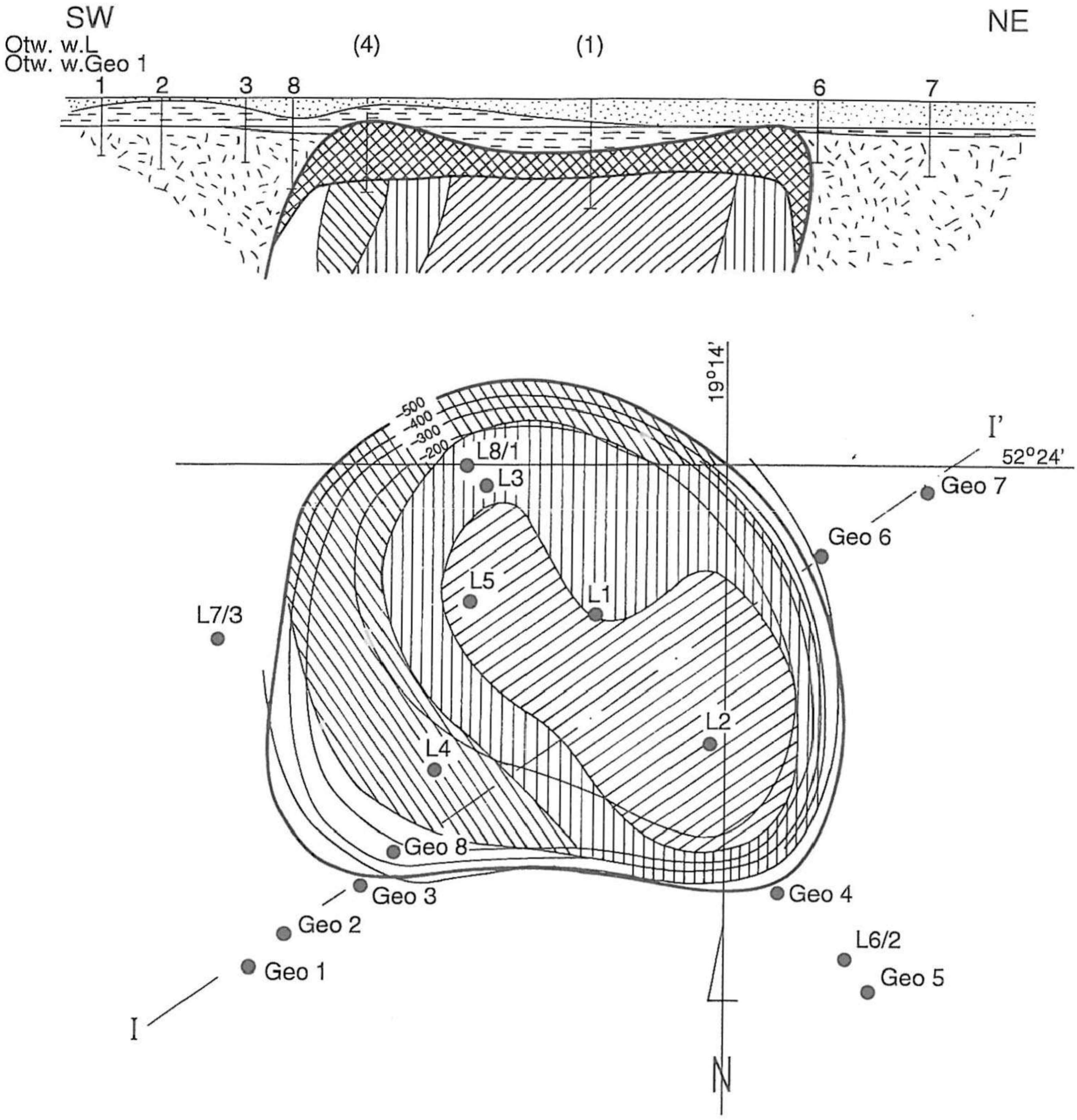
4.2.4. Wysad solny Lubień Kujawski

Wysad jest zlokalizowany w południowej części województwa włocławskiego, w gminie Lubień Kujawski. Został rozpoznany badaniami geofizycznymi i szeregiem otworów wiertniczych (rys. 4.4).

Kształt wysadu w rzucie poziomym jest zbliżony do lekko spłaszczonego koła o powierzchni 3,1 km^2 i średnicy od 2 do 2,5 km. Zwierciadło solne jest zlokalizowane na głębokości 325 m i ma prawie płaską powierzchnię. Czapa wysadu jest w przeważającej części zbudowana z utworów ilastych. Jej miąższość waha się w granicach od 90 do 220 m, a przeprowadzone rozpoznanie nie stwierdziło występowania zjawisk krasowych. Powierzchnia terenu na obszarze wysadu jest płaska.

Wewnętrzna budowa wysadu jest skomplikowana w znacznym stopniu. Stwierdzono występowanie utworów należących do różnych cyklotemów: Z2 (sole starsze), Z3 (sole młodsze) i Z4 (sole najmłodsze). Kompleks starszych soli kamiennych tworzy największe nagromadzenie soli

czystych i mogą być one przedmiotem eksploatacji. Posiadają również najkorzystniejsze warunki do zlokalizowania w nich podziemnych zbiorników.



OBJAŚNIENIA

Geo 3 ● otwór wiertniczy wykonany

——— granica wysadu solnego na głębokości –500 m p.p.m.

—-400— warstwice powierzchni zwierciadła solnego (m n.p.m.)

- czwartorzęd
- trzeciorzęd
- mezozoik

PERM GÓRNY (P_2) – cechsztyn

- czapa wysadu solnego
- złoże solne
- sole kamienne najmłodsze (Z_4)
- sole kamienne młodsze (Z_3)
- sole kamienne starsze (Z_2)

0 500 1000 m

Rys. 4.4. Wysad solny Lubień Kujawski (wg [1])

4.2.5. Wysad solny Łanięta

Wysad solny Łanięta znajduje się na obszarze województwa płockiego. Wysad został zlokalizowany w wyniku prac geofizycznych, prowadzonych równocześnie z rozpoznaniem oddalonego o około 4 km w kierunku północno-zachodnim, wysadu Lubień Kujawski. W przekroju poziomym wysad ma kształt koła o średnicy 3,5 km. Przekrój pionowy złoża ma kształt typowy dla wysadu, którego masy solne całkowicie przebiły się przez warstwy mezozoiku (rys. 4.5).

Zwierciadło solne występuje na głębokości 250 m. W centralnej części wysadu jest ono przykryte czapą zbudowaną głównie z utworów gipsowych, zaś w częściach brzeżnych czapą iłową. Miąższość czapy waha się w granicach od 30 do 150 m. Ponad czapą zalegają utwory trzeciorzędowe o miąższości od zera do 160 m i utwory czwartorzędowe o miąższości od 36,4 do 100 m.

Spąg czapy iłowo-gipsowej jest jednocześnie zwierciadłem solnym. Rozpoznanie czterema otworami wiertniczymi wykazało skomplikowaną budowę wewnętrzną złoża. W wysadzie występują sole starsze i młodsze o zmiennym upadzie warstw od 30 - 850. Warunki hydrogeologiczne są typowe dla formacji skalnych otaczających złoża wysadowe.

4.2.6. Wysad solny Rogoźno

Wysad znajduje się na obszarze województwa łódzkiego. Udokumentowany został dwunastoma otworami badawczymi, prowadzonymi w celu rozpoznania złoża węgla brunatnego, które zalega powyżej wysadu (rys. 4.6).

Kształt przekroju poziomego przez wysad jest owalem, którego dłuższa oś ma kierunek NW - SE i długość ok. 6,7 km, a krótsza ok. 4,1 km. W przekrojach pionowych wysad ma kształt pnia przechylonego w kierunku północno-wschodnim.

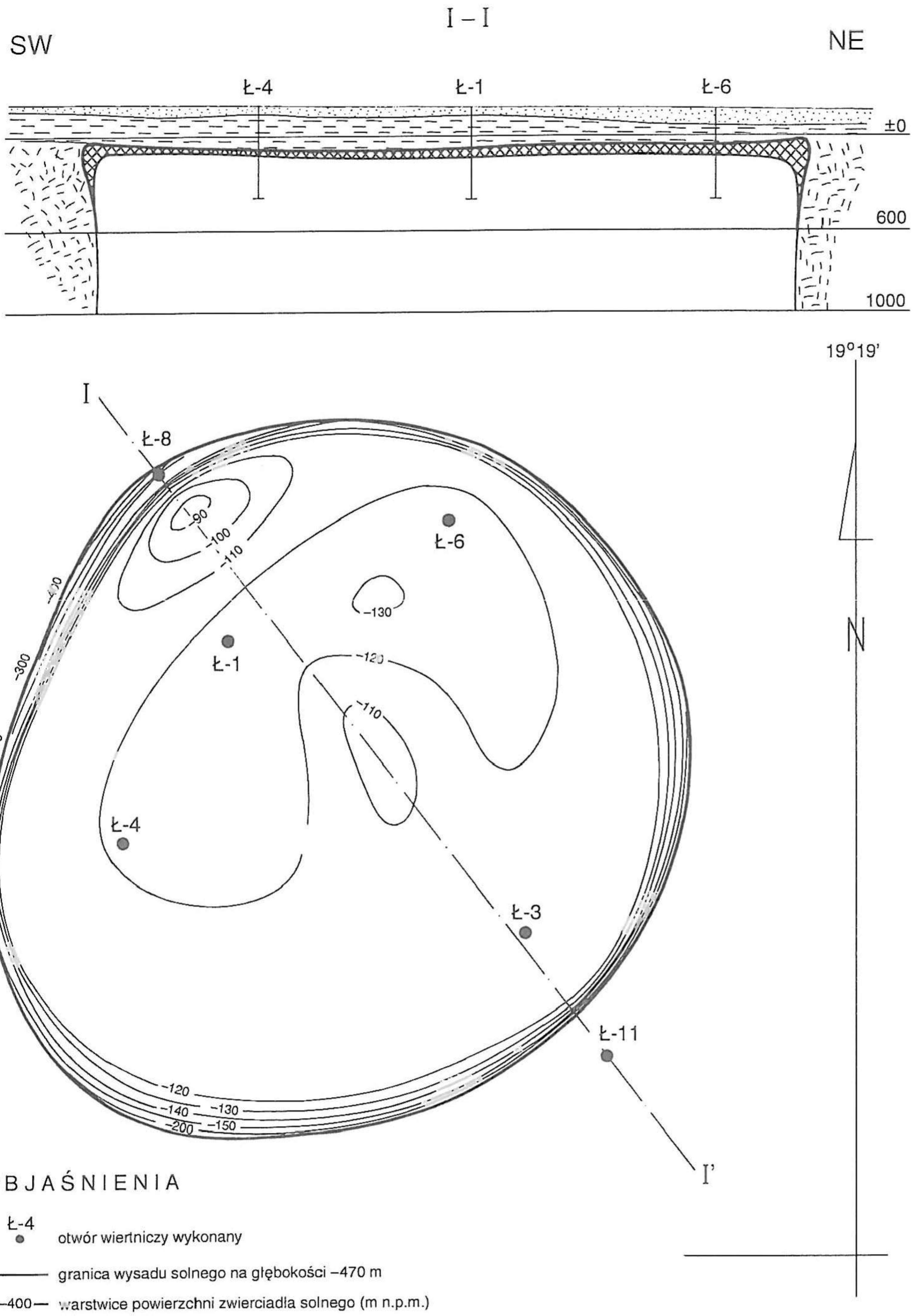
Zaleganie zwierciadła solnego jest urozmaicone, a deniwelacje dochodzą do 100 m. Obniżenie powierzchni zwierciadła obserwuje się przede wszystkim w środkowej części wysadu, gdzie pod czapą anhydrytowo-gipsową występują sole starsze (Z2). Średnia miąższość czapy wynosi od 100 do 150 m, a głębokość zalegania zwierciadła waha się w granicach od 210 do 500m. Sole starsze reprezentowane są przez sól kamienną średnio- i grubokrystaliczną, białą, z typowym zanieczyszczeniem substancją anhydrytowo-ilastą. Na obrzeżu wysadu występują sole młodsze (Z3).

Pod względem jakościowym sól kamienna w wysadzie "Rogoźno" stanowi surowiec o średniej zawartości czystego NaCl 97,85 %, przy czym priorytetowe znaczenie ma zalegające powyżej trzeciorzędowe złoże węgla brunatnego o udokumentowanej wartości przemysłowej.

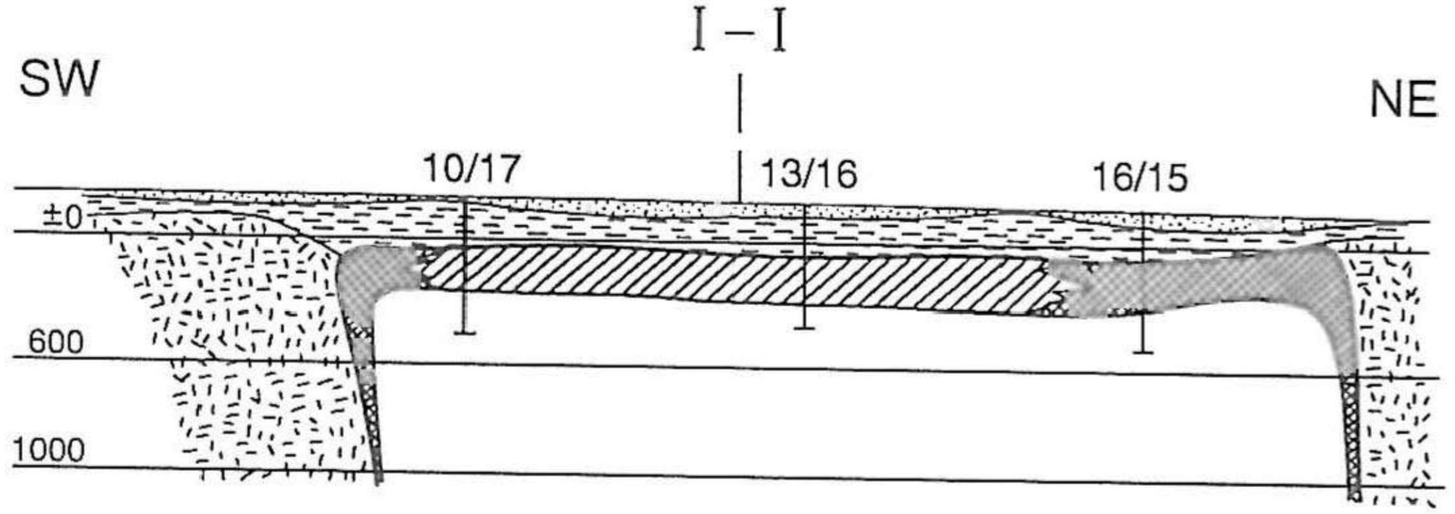
4.2.7. Wysad solny Damasławek

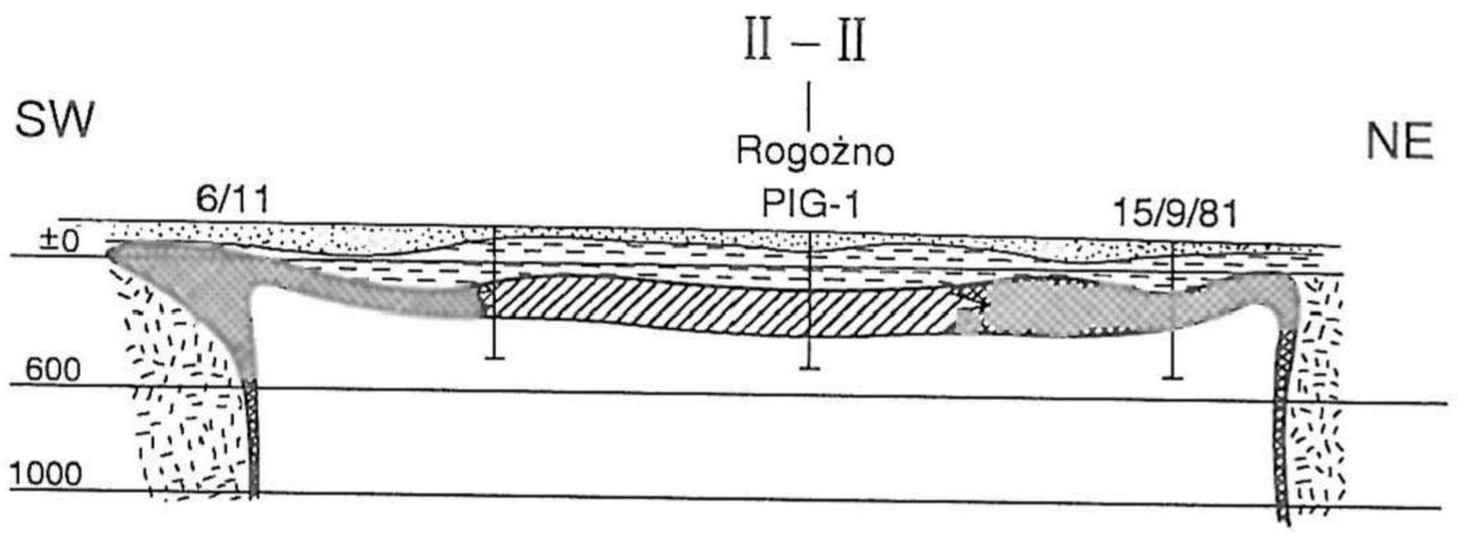
Wysad solny Damasławek znajduje się na obszarze województwa bydgoskiego. Złoże jest stwierdzone badaniami sejsmicznymi oraz dziewiętnastoma otworami wiertniczymi, z których sześć nawierciły czapę wysadu, a cztery zwierciadło solne. Pozostałe otwory nawierciły różne utwory kredowe otaczające wysad (rys. 4.7).

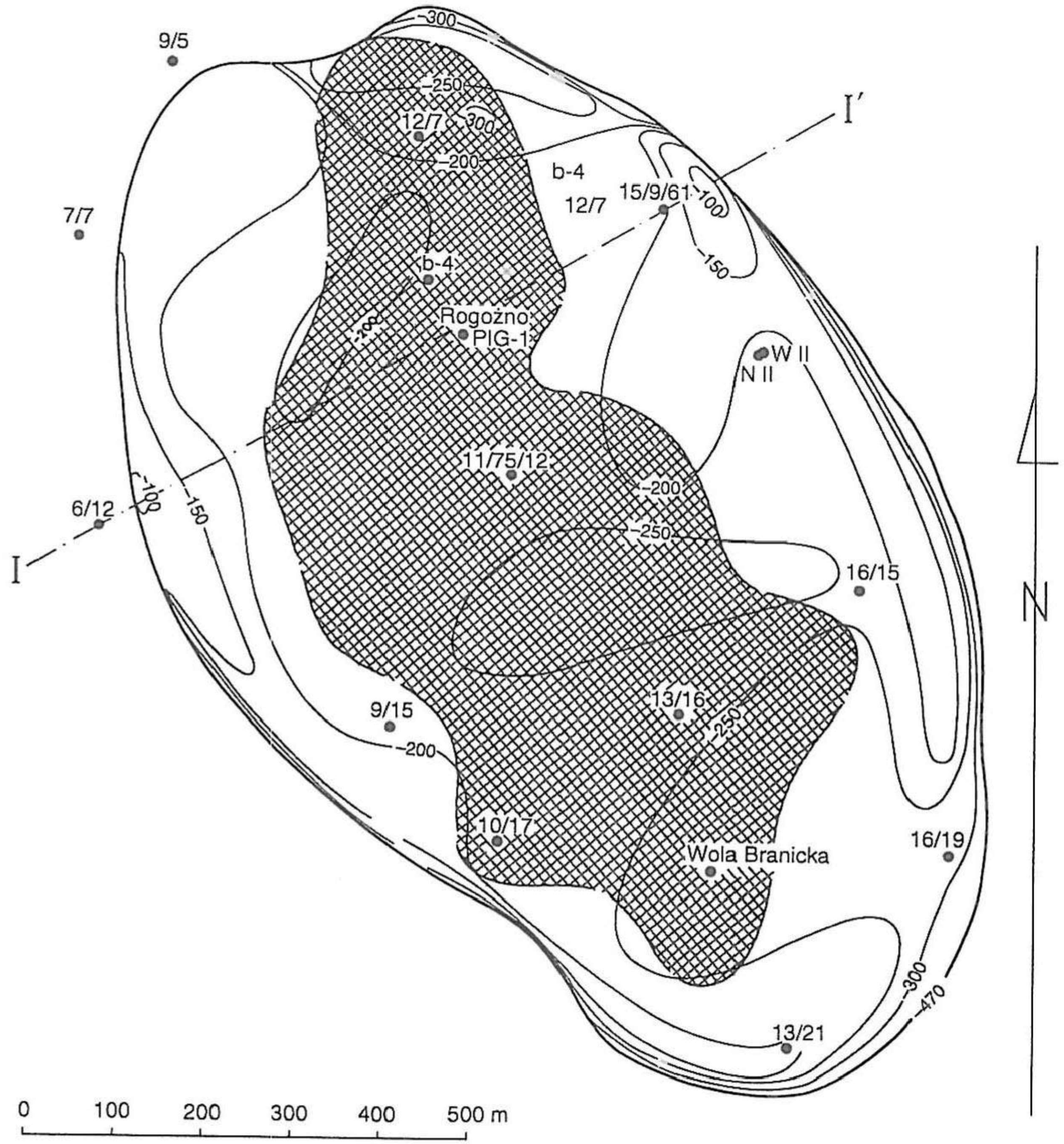
Wysad zlokalizowany jest w środkowej części antykliny, przebiegającej między wysadami Wapno i Mogilno. Cechsztyńskie masy solne przebiły w tym miejscu nadkładowe utwory mezo-



Rys. 4.5. Wysad solny Łanięta (wg [1])







OBJAŚNIENIA

13/16 otwór wiertniczy wykonany

granica wysadu solnego na głębokości –470 m p.p.m.

–400– warstwa powierzchni zwierciadła solnego (m p.p.m.)

granica zasięgu czapy gipsowo-anhydrytowej na wysadzie solnym

czwartorzęd

trzeciorzęd

mezozoik

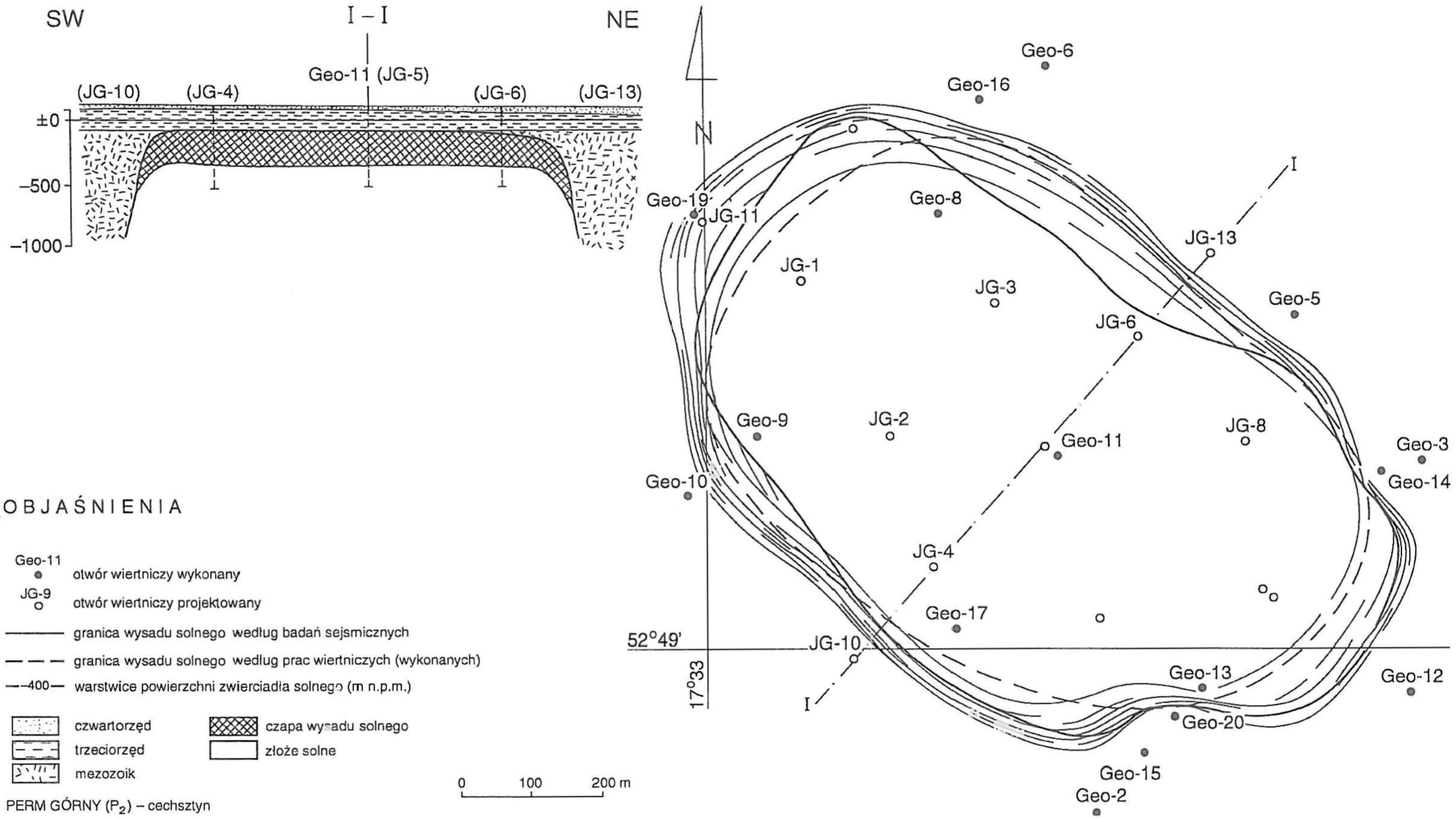
czapa wysadu solnego (iłowo-gipsowa)

czapa wysadu solnego (gipsowo-anhydrytowa)

złoże solne

PERM GÓRNY (P_2) – cechsztyn

Rys. 4.6. Wysad solny Rogoźno (wg [1])



Rys. 4.7. Wysad solny Damasławek (wg [1])

zoiczne w taki sposób, że wysad na obrzeżu jest przykryty utworami górnej kredy, a w części centralnej jedynie osadami trzecio- i czwartorzędowymi.

W przekroju poziomym wysad ma kształt zbliżony do elipsy o powierzchni ok. 11 km^2. Strop utworów solnych znajduje się na głębokości od 450 do 500 m. Wysad przykryty jest czapą gipsowo-iłową o miąższości od 200 do 250 m. Na podstawie istniejącej dokumentacji otworów wiertniczych jedynie w przybliżeniu można stwierdzić, że wysad budują starsze, białe sole kamienne oraz sole kolorowe, młodsze i najmłodsze. Nad złożem solnym występuje prawdopodobnie kilka poziomów wodonośnych w utworach czwartorzędowych oraz w piaskach mioceńskich i oligoceńskich. Także duże ilości wody mogą znajdować się w czapie gipsowej. Towarzyszące wysadowi utwory górnych ogniw kredy są silnie zapiaszczone, co sprzyja ich wodoprzepuszczalności.

4.2.8. Wysad solny Izbica Kujawska

Wysad znajduje się na obszarze województwa włocławskiego i został rozpoznany łącznie z całą strukturą solną „Izbica Kujawska - Kłodawa - Łęczyca" (rys. 4.8).

Kształt wysadu w rzucie poziomym zbliżony jest do stopy o dłuższej osi przebiegającej w kierunku S-N. Na głębokości 600 m długość wysadu wynosi ok. 5 km, a szerokość zmienia się od 1 km w części południowej do 2 km w części północnej. Zwierciadło solne zalega na głębokości ok. 200 m, a przykrywająca wysad czapa ma miąższość od 75 do 150 m i jest zbudowana przeważnie z utworów iłowo-gipsowych.

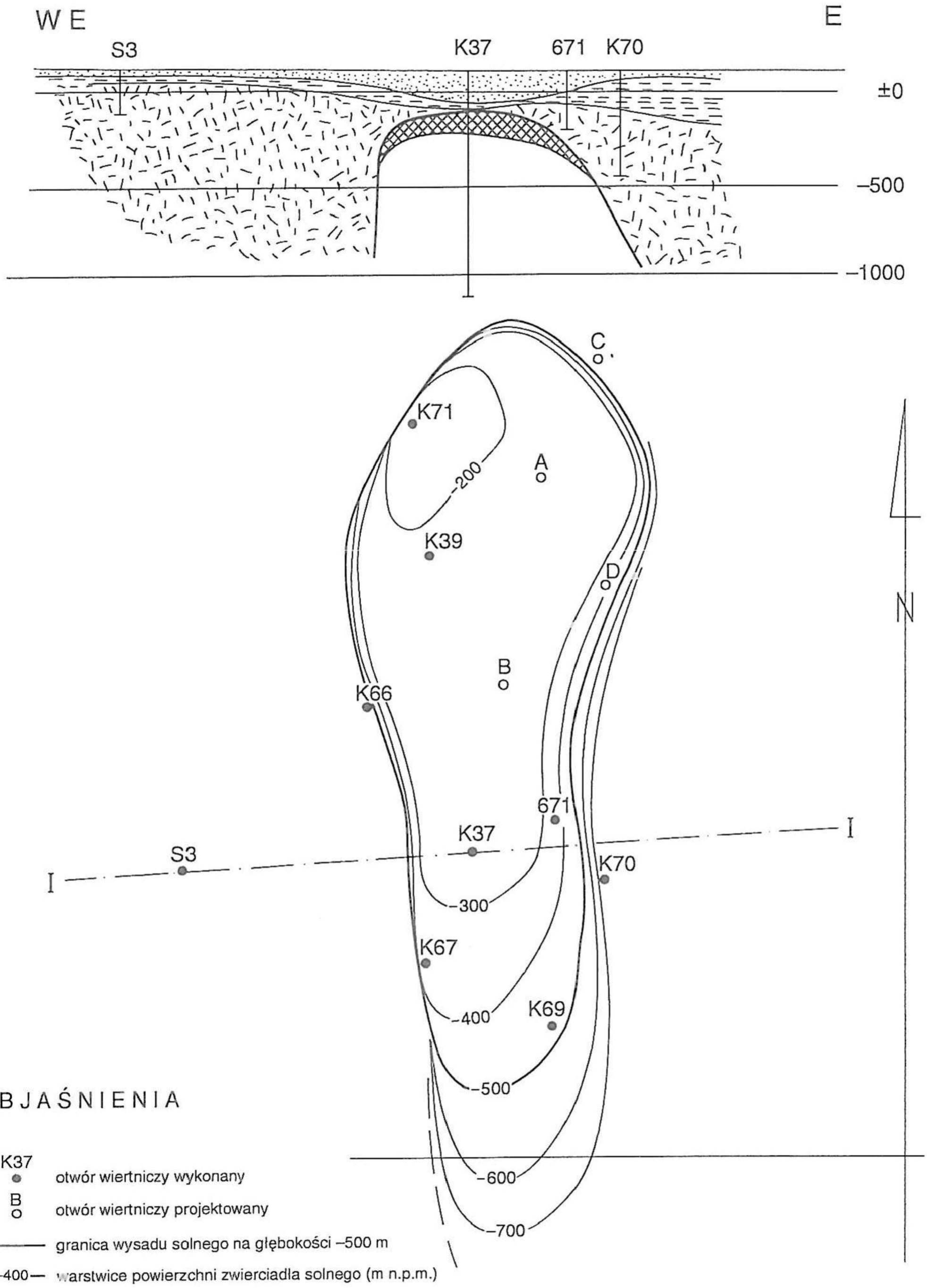
Złoże budują skały solne odpowiadające profilem wysadowi Kłodawa. Struktura wewnętrzna wykazuje charakterystyczną tektonikę fałdową.

4.2.9. Wysad solny Bełchatów

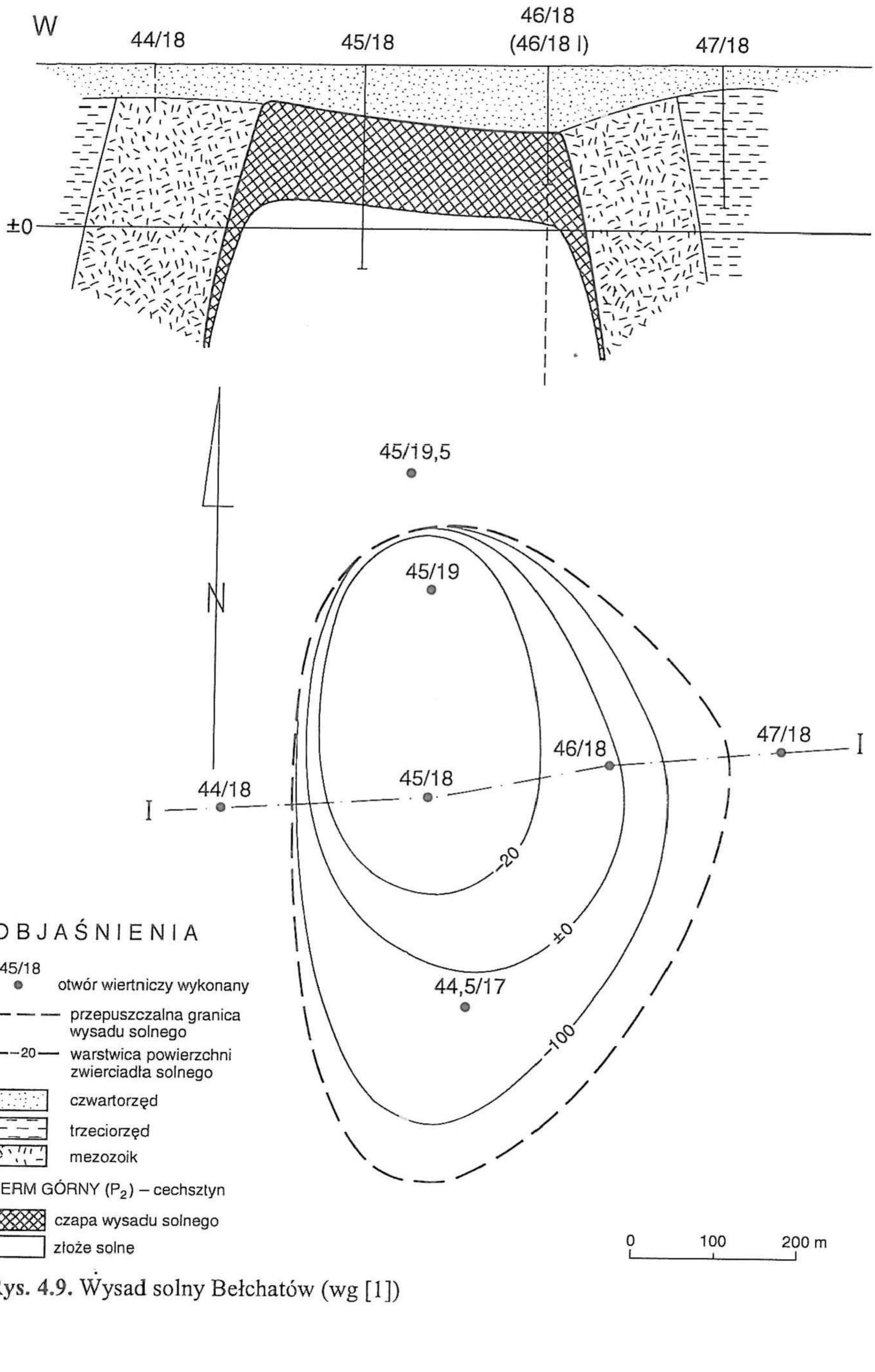
Wysad Bełchatów jest zlokalizowany na obszarze województwa piotrkowskiego w bezpośrednim sąsiedztwie złoża węgla brunatnego, podzielonego na dwa skrzydła: wschodnie „Bełchatów" i zachodnie „Szczerców" (rys. 4.9). Wysad został nawiercony pięcioma otworami badawczymi, z których trzy stwierdziły występowanie soli kamiennych.

W rzucie poziomym wysad ma kształt koła o średnicy 750 m i powierzchni ok. 0,5 km^2. Struktura solna przebija się przez utwory mezozoiczne i trzeciorzędowe, które na obrzeżu wysadu uległy całkowitemu zniszczeniu. W związku z tym czapa sięga bezpośrednio do spągu utworów czwartorzędowych, zlokalizowanych na głębokości od 50 do 65 m pod powierzchnią terenu. Czapa jest zbudowana z utworów iłowo-gipsowych, a zwierciadło solne zalega na głębokości od 170 do 200 m.

Wysad buduje głównie sól kamienna różnoziarnista biała, miejscami szara lub różowa. Wysad znajduje się w bezpośrednim zasięgu eksploatacji węgla brunatnego, w związku z czym warunki hydrogeologiczne zdecydowanie różnią się od pierwotnych i mogą ulegać dalszym przekształceniom, zależnie od stopnia zdepresjonowania tego rejonu studniami odwadniającymi kopalnię.



Rys. 4.8. Wysad solny Izbica Kujawska (wg [1])



Rys. 4.9. Wysad solny Bełchatów (wg [1])

4.3. Złoża pokładowe

4.3.1. Pokładowe złoże soli kamiennej LGOM

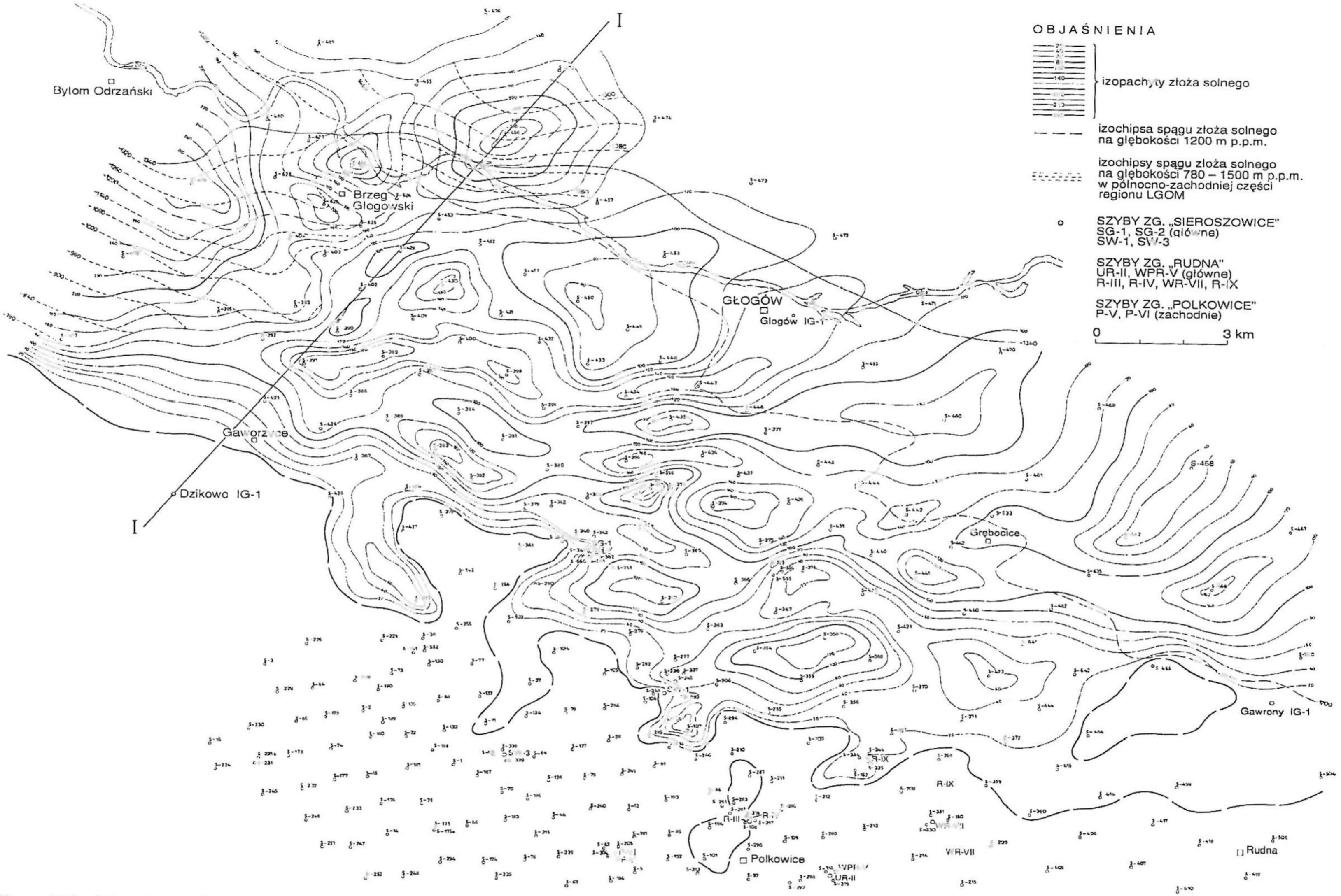
W obszarze Lubińsko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego występują generalnie trzy kompleksy skalne. Najstarszymi utworami są skały krystalicznego podłoża monokliny przedsudeckiej, reprezentowane głównie przez łupki łyszczykowo-kwarcowe, gnejsy i granodioryty. Wyżej zalegający kompleks tworzą skały piętra permsko-mezozoicznego, zbudowane przez utworu permu i triasu. W ich skład wchodzą osady czerwonego spągowca, formacji cechsztyńskiej i pstrego piaskowca. Osady czerwonego spągowca stanowi bardzo słabo rozpoznany, gruby kompleks skalny, zbudowany przede wszystkim z szarogłazowych piaskowców, niekiedy przewarstwionych łupkami ilastymi. W stropie występuje warstwa białych piaskowców o zmiennej miąższości, stanowiących podłoże cechsztynu.

Formację cechsztyńską tworzą osady chemiczne w postaci węglanów (dolomit i wapień), siarczanów (gips i anhydryt) oraz soli kamiennych. Całkowita miąższość warstw cechsztyńskich waha się od zera do 380 m. Generalnie wzrost miąższości jest zgodny z ogólnym kątem zapadania w kierunku północno-wschodnim (4.10). Nadkład stanowią utwory pstrego piaskowca w postaci różnoziarnistych piaskowców, z przewarstwieniami mułowców i łupków ilastych o łącznej miąższości do 480 m. Powyżej zalegają utwory kenozoiczne: głównie piaski, iły, mułki, niekiedy węgiel brunatny i żwiry (trzeciorzęd) oraz osady morenowe i rzeczne (czwartorzęd) o przeciętnej miąższości 420 m.

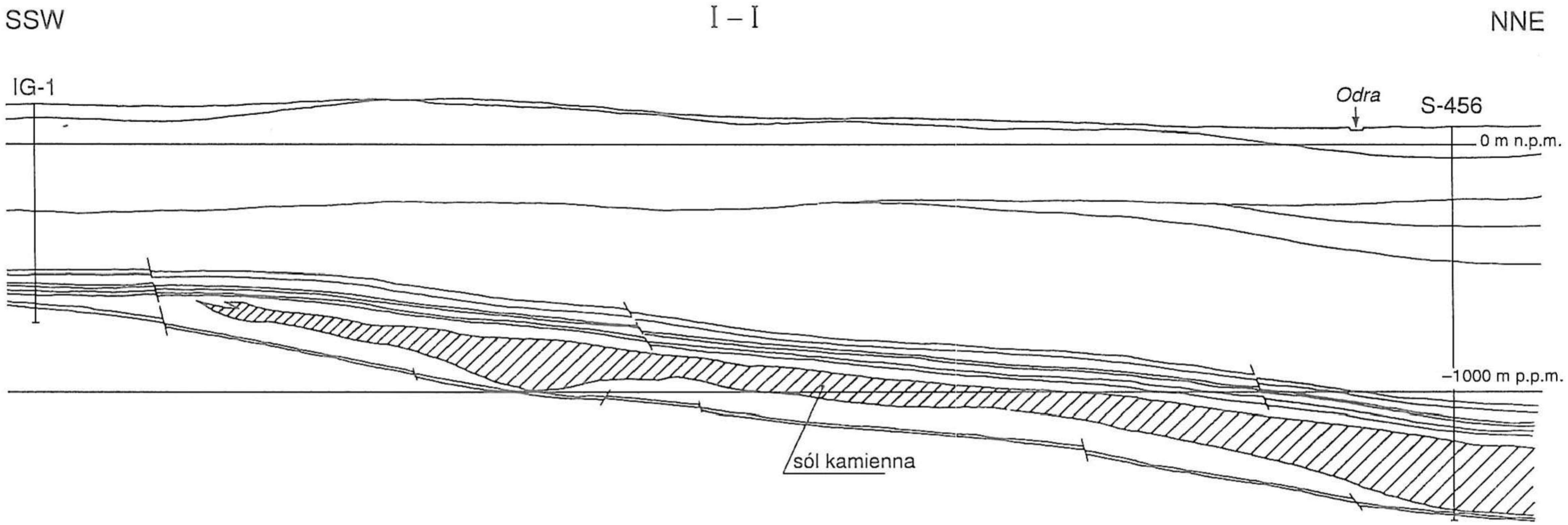
Zalegające w obrębie cechsztynu złoże soli kamiennej ma charakter pokładu o miąższości dochodzącej lokalnie do 180 m (4.11). Pokład zawiera skupienia soli kamiennej o bardzo dużej, przekraczającej 98 % NaCl, czystości. Znajduje się w korzystnych warunkach hydrogeologicznych, bowiem od potencjalnych poziomów wodonośnych jest oddzielone grubą warstwą zwięzłego anhydrytu. W obszarze kopalni Sieroszowice pokład jest udostępniony dwoma szybami i przekopem, które to wyrobiska obsługują eksploatację rud miedzi.

4.3.2. Złoże Chłapowo-Mieroszyno

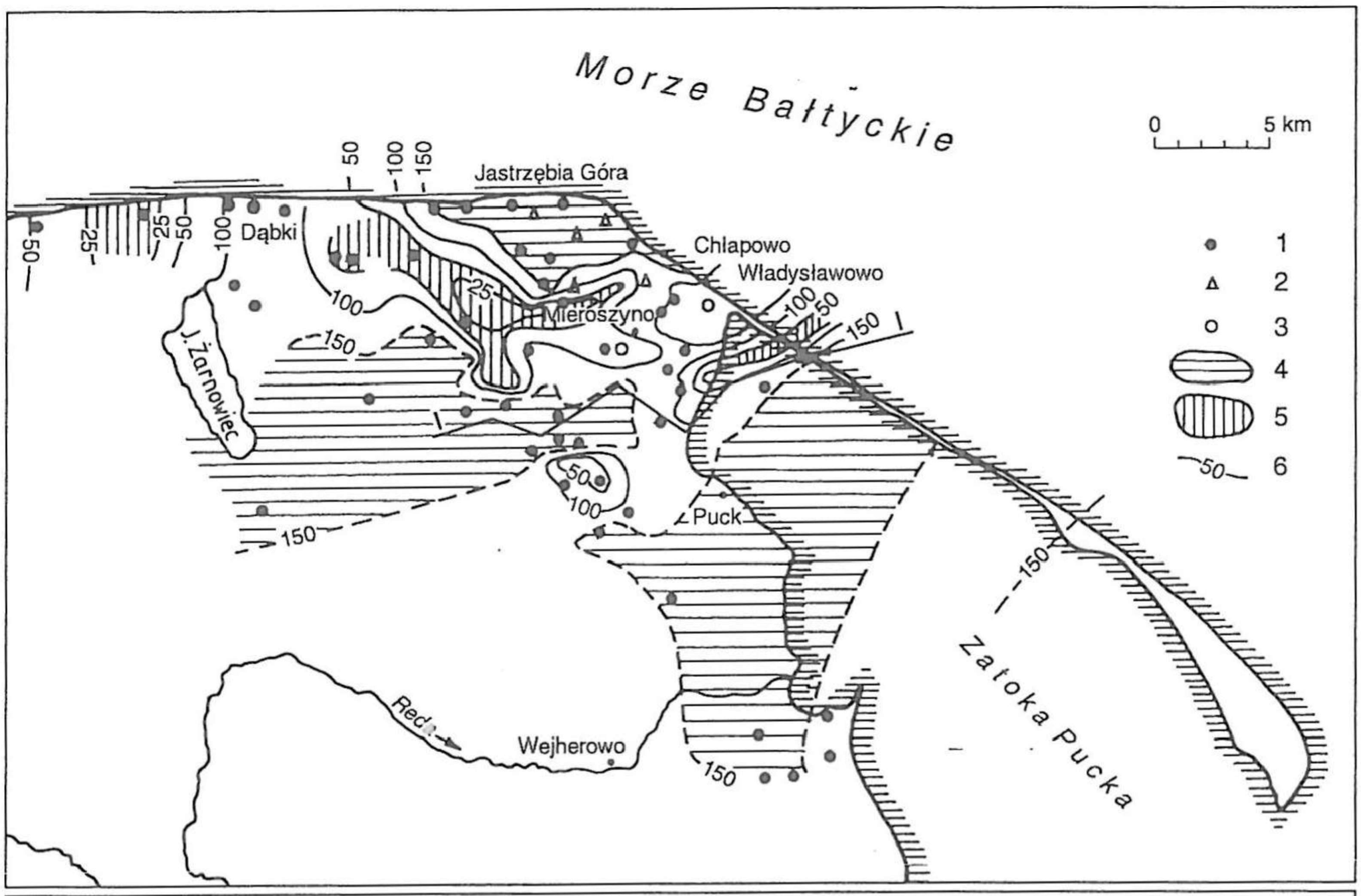
Na obszarze ok. 2 tys. km^2 rozciągającym się od Zatoki Puckiej do wyniesienia Łeby na głębokościach od 700 do 1000 m stwierdzono występowanie prawie poziomo zalegającej serii solnej, zbudowanej z kompletnie wykształconego cyklotemu soli najstarszych Z1, z kilkudziesięciometrowym pokładem soli kamiennej (4.12). Szczegółowe rozpoznanie, przeprowadzone w rejonie Chłapowa i Mieroszyna oraz Swarzewa i Zdrady wykazało współwystępowanie poziomów soli potasowo-magnezowych, polihalitów i soli kamiennej. Pokład soli kamiennej ma zróżnicowaną miąższość i niejednorodną strukturę, co stanowi jego istotną wadę. Jednakże na podstawie dostępnych informacji, można stwierdzić, że budowa magazynu sprężonego powietrza jest możliwa po wskazaniu szczegółowej lokalizacji.

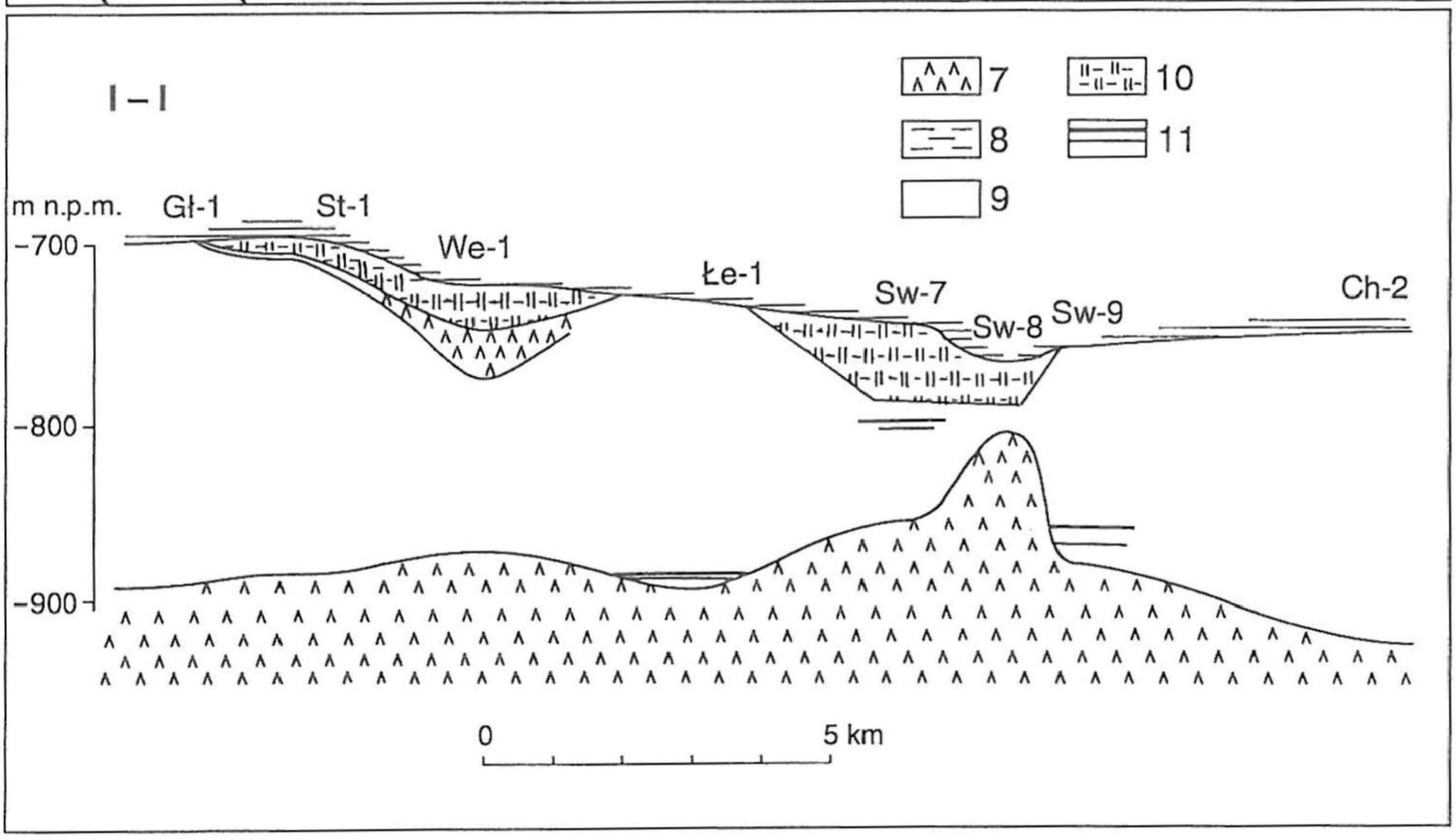


Rys. 4.10. Mapa izopachytowa złoża soli LGOM (wg [41])



Rys. 4.11. Przekrój przez złoże soli kamiennej LGOM w rejonie Brzegu Głogowskiego (wg [41])





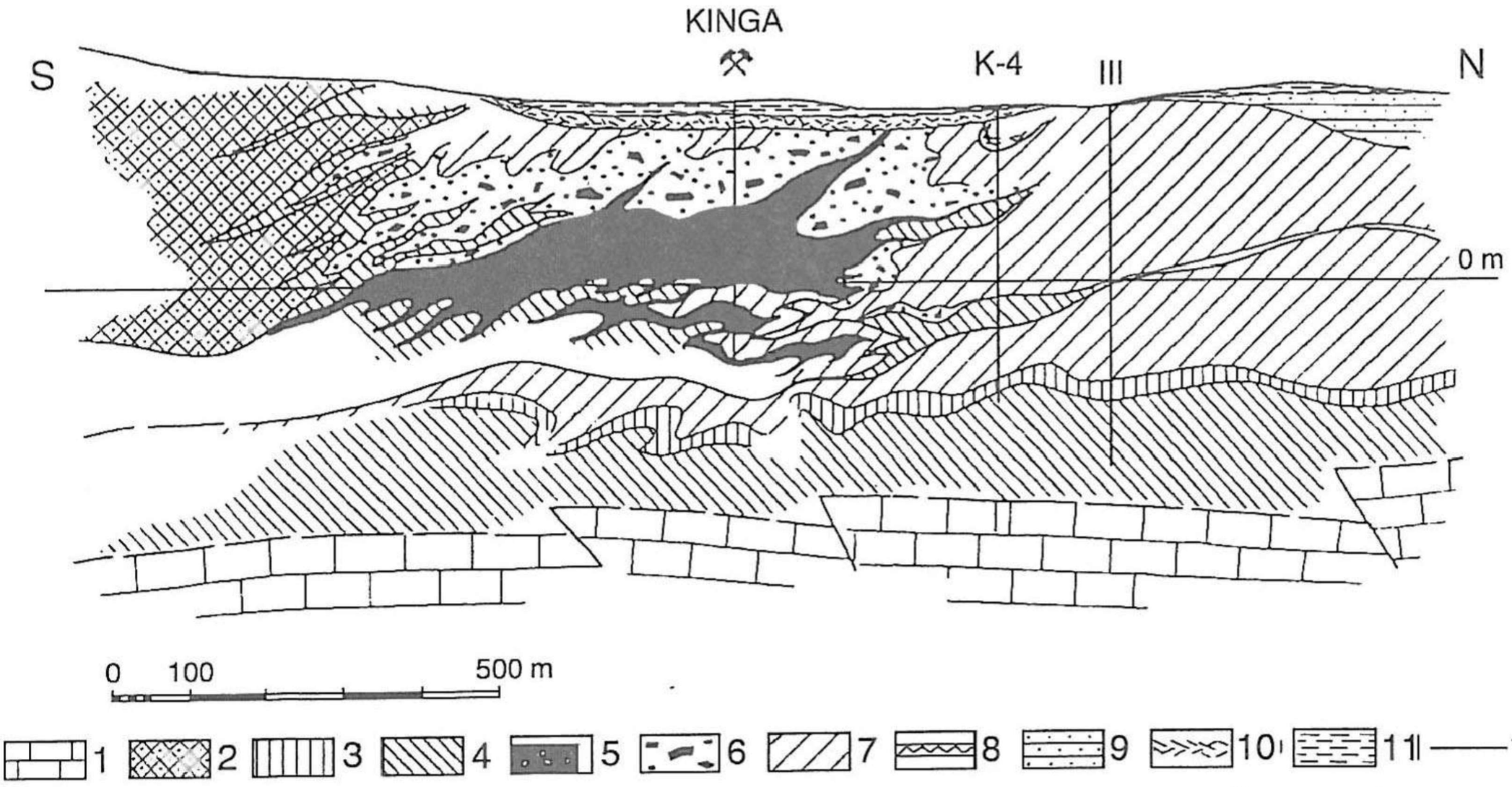
Rys. 4.12. Złoże soli na Wyniesieniu Łeby: 1 – otwory wiertnicze, 2 – występowanie polihalitu w soli kamiennej, 3 – występowanie chlorkowych soli potasowo-magnezowych, 4 – obszary basenów, 5 – obszary wyniesień, 6 – izopachyty złoża soli, 7 – anhydryt, 8 – iły i iłowce, 9 – sól kamienna czysta, 10 – sól kamienna zanieczyszczona, 11 – polihality

4.3.3. Złoże Rybnik-Żory-Orzesze

Złoże znajduje się na obszarze południowej części Górnego Śląska i ma powierzchnię około 80 km^2. Dzięki znacznemu oddaleniu od brzegu Karpat, złoże to nie uległo sfałdowaniu pod wpływem nasuwających się od południa utworów fliszowych. Nad osadami karbonu produktywnego, tworzącymi rozległą nieckę, na głębokości ok. 200 - 300 m zalega seria solna o miąższości od 50 do 80 m. W obrębie tej serii występuje pakiet pokładów soli kamiennej, z których najgrubszy ma miąższość przekraczającą 20 m. Pokłady zalegają pod kątem nie przekraczającym 10 stopni i na ogół są zbudowane z soli gruboziarnistej. Złoże to zostało rozpoznane otworami wiertniczymi w związku prowadzoną w tym rejonie eksploatacją węgla kamiennego. Złoże pozostaje w bezpośrednim zasięgu wpływu robót górniczych, i w związku z tym, w chwili obecnej nie może być miejscem lokalizacji magazynu powietrza. Jego niewielka miąższość także nie predysponuje go do takiego wykorzystania.

4.3.4. Złoże soli Wieliczka

Złoże Wieliczka ciągnie się w kierunku wschód-zachód pasem o szerokości około 1 km i długości 6 km. Pokłady soli kamiennej udostępnione są do głębokości ponad 300 m, a najpłycej zalegająca część złoża bryłowego była przedmiotem eksploatacji przed tysiącem lat. W profilu stratygraficznym występują od dołu: piaskowce o spoiwie anhydrytowym lub solnym, iły z anhydrytem i warstwami soli, sól szybikowa drobno- i średnioziarnista, pakiet warstw tworzących sól spizową (4.13). Pokłady solne przedzielone są warstwami ilasto-anhydrytowymi lub mułowcowo-piaszczystymi. W najwyższej części złoża występują iły solne i zubry z bryłami gru-



Rys. 4.13. Złoże soli Wieliczka (wg [20]): 1 – wapienie górnej jury, 2 – utwory fliszowe, 3 – warstwy skawińskie, 4 – warstwy wielickie w facji siarczanowej (gipsy z iłem), 5 – kompleks soli pokładowych, 6 – kompleks zubrowy, 7 – warstwy chodenickie, 8 – gipsy kompleksu zubrowego, 9 – warstwy grabowieckie, 10 – zwietrzelina gipsowo-iłowa na złożu solnym, 11 – gliny plejstoceńskie, 12 – linie głównych nasunięć

boziarnistej soli zielonej. W wewnętrznej budowie złoża zaznacza się wyraźna dwudzielność tektoniczna, będąca wynikiem nasunięcia się górnej, druzgotowej części złoża na dolną, pokładową. W części dolnej, silnie zaburzonej tektonicznie, występują sole w fałdach powalonych w kierunku północnym, przechodzących w łuski. Część górna zbudowana jest z bezładnej masy iłów z nieregularnymi bryłami soli o różnej wielkości. Ze względu na rodzaj soli wyróżnia się dwie odmiany brył. Jedne zbudowane są z gruboziarnistej soli barwy zielonoszarej (sól zielona), drugie - z bardzo gruboziarnistej soli przewarstwionej nieregularnie soczewkami ciemnego iłu marglistego (sól witrażowa).

Na obszarze złoża wielickiego utworami wodonośnymi są warstwy czwarto- i trzeciorzędowe oraz jury. Utwory fliszu karpackiego są tu praktycznie niezawodnione, a zasadnicze zagrożenie niosą poziomy wodonośne trzeciorzędu: warstwy skawińskie i chodenickie oraz spękane ewaporaty w obrębie serii solnej. Zdecydowana większość zarejestrowanych wycieków grupuje się w pobliżu północnej granicy złoża. Objawy gazonośności są niewielkie i związane głównie z pokładem soli najstarszych oraz kompleksem spizowym.

Eksploatacja złoża została zakończona, a prowadzona działalność górnicza ogranicza się do utrzymania historycznej części kopalni.

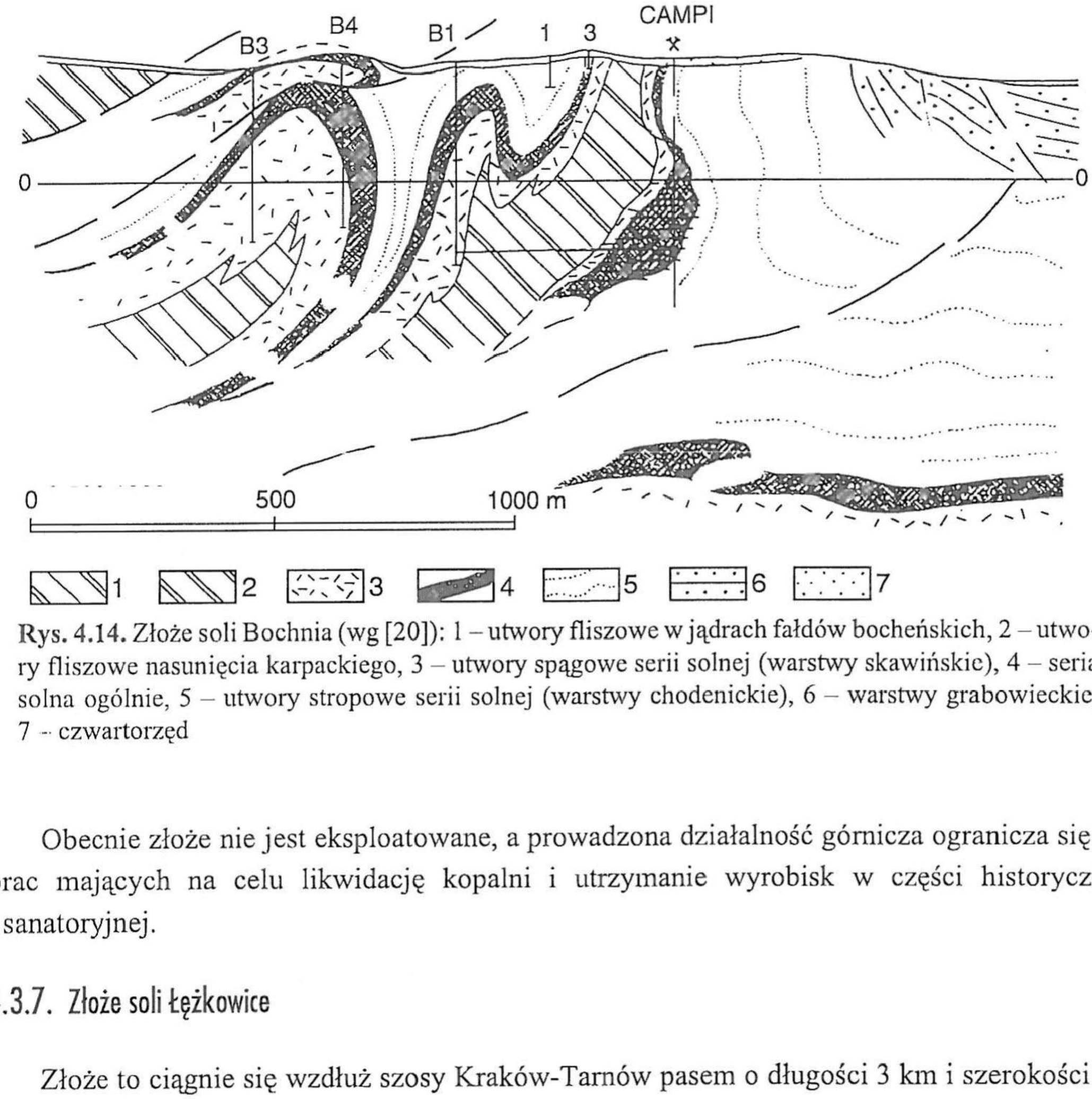
4.3.5. Złoże soli Barycz

Złoże jest przedłużeniem złoża wielickiego w kierunku południowo-zachodnim i ma powierzchnię około 1 km2. Złoże zalega na głębokości od 200 do 300 m i zbudowane jest z zespołu warstw solnych i iłowo-anhydrytowych, silnie sfałdowanych od strony Karpat, o miąższości od 30 do 50 m. Złoże jest eksploatowane otworami wiertniczymi z powierzchni ziemi, a sposób eksploatacji tzw. tunelowej wyklucza możliwość lokalizacji w nim zbiorników sprężonego powietrza.

4.3.6. Złoże soli Bochnia

Złoże Bochnia ciągnie się w kierunku wschód-zachód na długości około 4 km, przy czym jego szerokość zmienia się od kilkudziesięciu do 200 metrów. Głównym elementem tektoniki jest antyklina północna, nazwana fałdem bocheńskim (4.14). W jej skrzydle znajduje się udostępniona do eksploatacji partia złoża. Prawie równolegle do fałdu bocheńskiego zalega antyklina południowa, tzw. fałd Uzborni, na który nasunięty jest flisz karpacki. Utwory fliszowe występują także w jądrach obu antyklin. Górna część złoża soli jest ułożona prawie pionowo. Wraz ze wzrostem głębokości kąt upadu maleje i poniżej głębokości 200 - 300 m złoże zapada w kierunku południowym pod kątem od 15 do 40 stopni. Jedynie wschodnia część złoża zalega na całej głębokości w postaci monokliny, zapadającej na południe. W złożu wyróżniono trzy kompleksy warstw, które zawierają odmienne gatunki soli. Podział na sole południowe, środkowe i północne ilustruje położenie największych skupień soli w przekroju poprzecznym przez złoże. Największym skupieniem jest kompleks soli środkowych, który zbudowany jest z kilku warstw soli zróżnicowanej petrologicznie. Charakterystycznym osadem tego kompleksu są sole pasiaste, które były głów-

nym przedmiotem eksploatacji. Złożu towarzyszą utwory wodonośne, występujące w obrębie czwarto- i trzeciorzędu oraz kredy. Największe zagrożenie stwarzają piaskowce fliszu karpackiego, zalegające pośród iłołupków, razem z którymi tworzą jądra fałdów. W złożu występują również niewielkie ilości metanu, często ze śladami cięższych węglowodorów. Ich występowanie jest związane z południową granicą złoża.



Rys. 4.14. Złoże soli Bochnia (wg [20]): 1 – utwory fliszowe w jądrach fałdów bocheńskich, 2 – utwory fliszowe nasunięcia karpackiego, 3 – utwory spągowe serii solnej (warstwy skawińskie), 4 – seria solna ogólnie, 5 – utwory stropowe serii solnej (warstwy chodenickie), 6 – warstwy grabowieckie, 7 – czwartorzęd

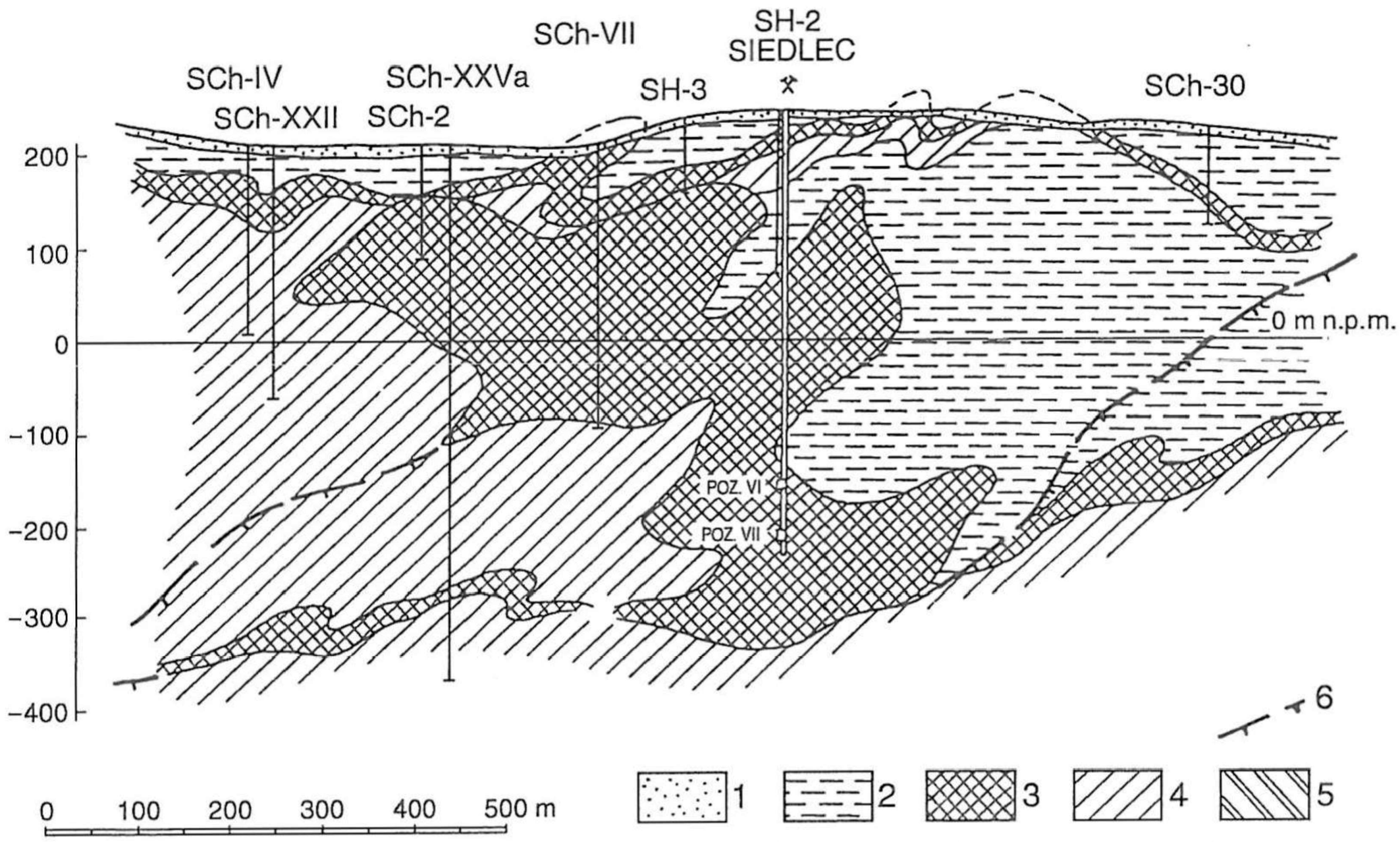
Obecnie złoże nie jest eksploatowane, a prowadzona działalność górnicza ogranicza się do prac mających na celu likwidację kopalni i utrzymanie wyrobisk w części historycznej i sanatoryjnej.

4.3.7. Złoże soli Łężkowice

Złoże to ciągnie się wzdłuż szosy Kraków-Tarnów pasem o długości 3 km i szerokości od 500 do 700 m, w odległości około 10 km na zachód od Bochni. W złożu Łężkowice pokłady soli kamiennej i osadów iłowo-anhydrytowych zostały stromo spiętrzone w system fałdów. Zasoby geologiczne zostały rozpoznane do głębokości 500 m, przy czym najpłytsze występowanie stwierdzono na głębokości 40 m. Złoże było obiektem otworowej eksploatacji solanki. Na skutek błędnej technologii ługowania, w złożu powstały liczne połączenia hydrauliczne między komorami i wodami okołozłożowymi. Fakt ten wyklucza możliwość jakiejkolwiek działalności w niewyeksploatowanej części złoża.

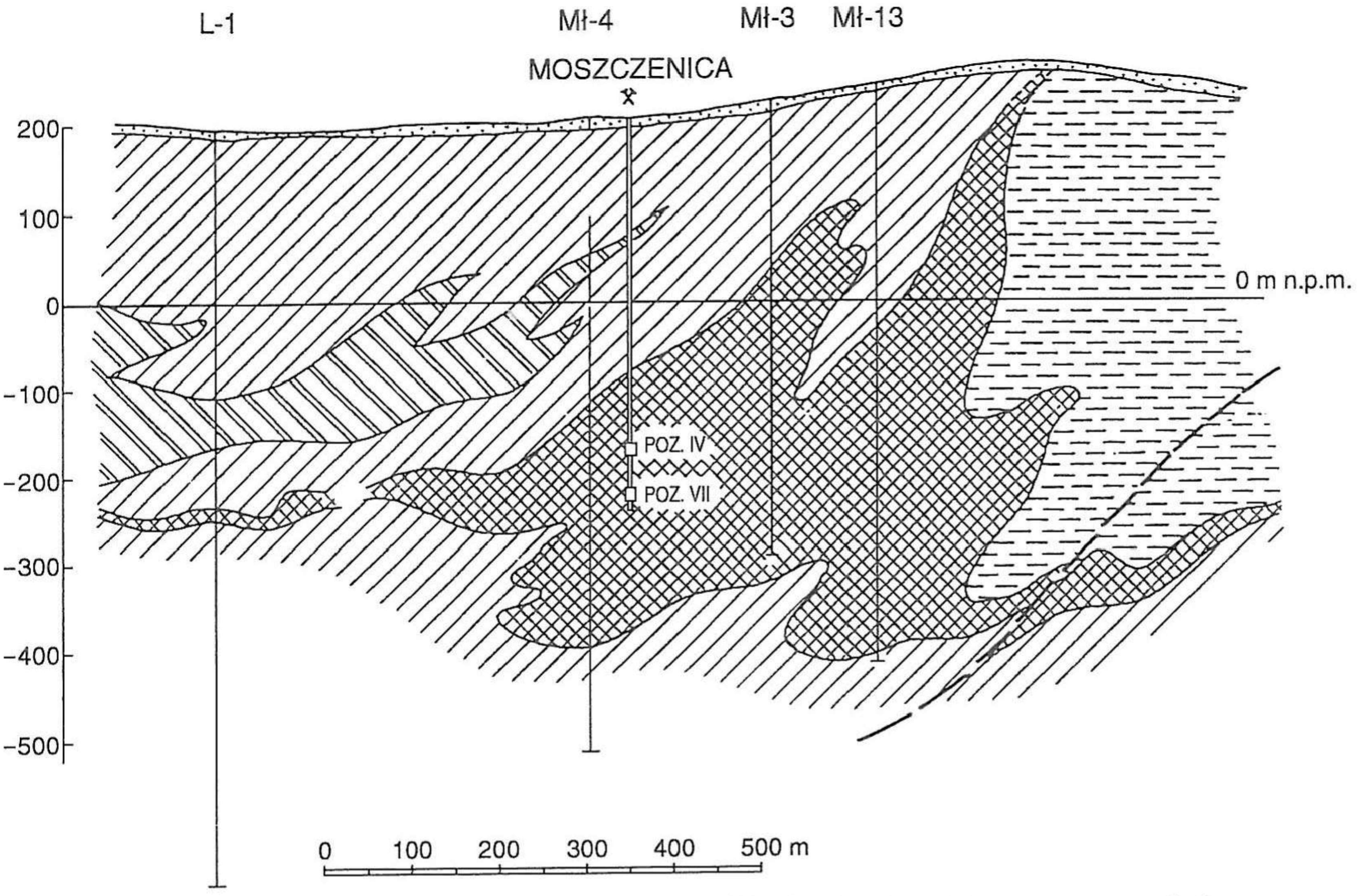
4.3.8. Złoże Siedlec-Moszczenica

Złoże stanowi wschodnie przedłużenie złoża Łężkowice wzdłuż drogi Kraków-Tarnów i ma podobną budowę. Ciągnie się pasem szerokości około 1 km i długości 6 km. Podobnie jak pozostałe złoża tego rejonu, od południa graniczy z warstwami skawińskimi (podsolnymi), od północy zaś z warstwami chodenickimi (nadsolnymi). Złoże charakteryzuje się dwoma odmiennymi stylami tektonicznymi: łężkowickim na zachodzie i bocheńskim na wschodzie. W części zachodniej złoże osiąga największą szerokość ok. 700 m w górnych partiach, poniżej głębokości 300 m zwęża się do szerokości 100 m (rys. 4.15). Górne partie we wschodniej części złoża są zwężone do



Rys. 4.15. Złoże soli Siedlec-Moszczenica. Rejon szybu Siedlec (wg [20]): 1 – czwartorzęd, 2 – warstwy chodenickie, 3 – seria solna ogólnie, 4 – warstwy skawińskie, 5 – utwory fliszu karpackiego, 6 – płaszczyzny nasunięcia

szerokości 50 m i tworzą wychodnie pod czwartorzędem (rys. 4.16). Niżej złoże rozszerza się i na głębokości 400 m osiąga szerokość do 850 m. W profilu stratygraficznym wyróżniono kompleksy soli południowych, środkowych i północnych. Dominującą pozycję posiada kompleks soli środkowych, zbudowany z kilku warstw soli zróżnicowanych petrologicznie, z których najbardziej charakterystyczną jest sól pasiasta. Złoże, będące przedłużeniem antykliny bocheńskiej, ma równie zaburzoną tektonikę. Ma postać stromo spiętrzonych fałdów i łusek o dużej amplitudzie. Złożu towarzyszą poziomy wodonośne związane z utworami czwarto- i trzeciorzędu oraz fliszu karpackiego. Największe zagrożeniem jest strefa kontaktu z utworami chodenickimi, które od strony północnej zostały wciągnięte między serię solną. Warstwy solne są słabo gazonośne. Największe skupienia metanu i innych węglowodorów związane jest z południową granicą złożą i z warstwami spągowymi.



Rys.4.16. Złoże soli Siedlec-Moszczenica. Rejon szybu Siedlec (wg [20]): 1 – czwartorzęd, 2 – warstwy chodenickie, 3 – seria solna ogólnie, 4 – warstwy skawińskie, 5 – utwory fliszu karpackiego, 6 – płaszczyzny nasunięcia

Złoże udostępnione jest do głębokości 460 m dwoma poziomami, łączącymi szyby: Siedlec i Moszczenica. Wobec braku zasobów zapewniających efektywność eksploatacji, kopalnia Siedlec-Moszczenica postawiona została w stan likwidacji, a istniejące wyrobiska mogą być wykorzystane do celów niegórniczych. Możliwa jest także budowa podziemnego magazynu sprężonego powietrza, udostępnionego z powierzchni lub wyrobisk podziemnych.

4.4. Ocena przydatności złóż soli do budowy zbiorników sprężonego powietrza

Przedstawiona charakterystyka złóż skłania do stwierdzenia, że mioceńskie złoża pokładowe na Przedkarpaciu nie powinny być brane pod uwagę jako miejsce lokalizacji zbiorników sprężonego powietrza. Czynnikiem decydującym nie są w tym przypadku ustalone kryteria przydatności, ale sposób w jaki złoża te są objęte działalnością górniczą. Złoża w rejonie Wieliczki i Bochni są już w zasadzie wyeksploatowane, a skutki eksploatacji w górotworze tak rozległe, że gdyby nawet znaleziono możliwości lokalizacyjne dla zbiornika sprężonego powietrza, to jego bezpieczna eksploatacji nie wchodzi w rachubę. Jedynym miejscem możliwym do budowy zbiornika w tym rejonie jest pewna partia złoża Siedlec-Moszczenica w sąsiedztwie szybu Siedlec, w obszarze nie prowadzonej działalności górniczej kopalni Siedlec-Moszczenica. Podobnie, nie ma obecnie możliwości lokalizacji zbiornika powietrza w złożu Rybnik-Żory-Orzesze, które pozostaje w bezpośrednim zasięgu wpływów eksploatacji pokładów węgla kamiennego.

Natomiast można poddać dyskusji przydatność pozostałych złóż pokładowych: na wyniesieniu Łeby i w obszarze monokliny przedsudeckiej. Jednoznaczna ocena obydwu złóż w zakresie kryteriów geologiczno-górniczych jest utrudniona, ze względu na niedostateczne, dla celów projektowania podziemnych magazynów sprężonego powietrza, rozpoznanie. Jednakże charakter budowy pozwala stwierdzić, że istnieją możliwości wskazania miejsc odpowiedniej lokalizacji (np. w rejonie Brzegu Głogowskiego). Obydwa złoża należy natomiast bardzo wysoko ocenić pod względem spełnienia kryteriów zewnętrznych: dostępu do źródeł wody i miejsc zbytu solanki. Solankę ze złoża Chłapowo-Mieroszyno można zrzucać do morza, zaś ze złoża w LGOM zatłaczać do pobliskich struktur pogazowych.

Odnośnie wysadów solnych należy stwierdzić, że ich stopień rozpoznania jest stosunkowo niski. Najlepiej udokumentowane są wysady: Łanięta, Lubień Kujawski, Mogilno i Góra, w mniejszym stopniu: Rogoźno, Damasławek oraz część północna i południowa wysadu Kłodawa. Stwierdzony wierceniami, ale nie udokumentowany geologicznie jest wysad Izbica Kujawska i wysad Bełchatów.

Wysady Góra, Mogilno i środkowa część Kłodawy są terenem działalności górniczej i z tego względu ich stopień rozpoznania jest bardzo dobry.

Z pozostałych, najlepiej rozpoznanym złożem jest wysad Łanięta. Jest on udokumentowany w kategorii C_1, co upoważnia do podjęcia decyzji o działalności eksploatacyjnej. Złoże zostało nawiercone 14 otworami o głebokości od 300 do 500 m, w odstępie od 400 do 600 m. Otwory sięgają poniżej zwierciadła solnego na głębokość ok. 100 m. Stosunkowo duże wymiary wysadu i jego korzystny kształt pozwalają przypuszczać, że wysad zawiera skupienia soli kamiennej przydatnej do budowy zbiorników sprężonego powietrza.

Drugim pod względem rozpoznania jest wysad Lubień Kujawski: w 50 % w kategorii C_1 i w 50 % w kategorii C_2. Sól nawiercona została 7 otworami rozpoznawczymi, sięgającymi średnio 100 m poniżej zwierciadła. Ponadto w centralnej części wysadu wykonano 2 otwory badawcze o głębokości 1200 m, które rozpoznały wewnętrzną strukturę wysadu pod kątem lokalizacji w nim magazynu gazu.

Stosunkowo dobrze jest również rozpoznany wysad Rogoźno. Rozpoznania dokonano metodami geofizycznymi i 12 otworami wiertniczymi, sięgającymi od 100 do 150 m poniżej zwierciadła solnego, w odstępie od 400 do 500 m.

Wysad Kłodawa jest rozpoznany w różnym stopniu. Część środkowa jest eksploatowana, stąd jej rozpoznanie jest najlepsze. W części północnej 10 otworów rozpoznawczych jest zlokalizowanych w liniach badawczych oddalonych o 2500 m. Kierując się wynikami tych wierceń i analogią do eksploatowanej części wysadu, należy zaliczyć wysad do trudnych do udokumentowania, ze względu na duży stopień zaburzeń tektonicznych.

Wysady: Damasławek, Izbica Kujawska i Bełchatów nie są udokumentowane, a ich rozpoznanie należy traktować jako wstępne. Wysady te nawiercono nielicznymi otworami, z których tylko część nawierca zwierciadło solne.

Wszystkie złoża wysadowe posiadają wystarczającą powierzchnię i objętość do lokalizacji w nich magazynów sprężonego powietrza z odpowiednią do projektowanych mocy elektrowni liczbą zbiorników.

Głębokość spągu wszystkich złóż wysadowych jest praktycznie nieograniczona: wynosi co najmniej 3000 m. Natomiast głębokość zwierciadeł soli jest zróżnicowana i wynosi od 180 m (Bełchatów) do 600 m (część wysadu Izbica Kujawska). Zatem wszystkie wysady spełniają kryterium głębokości pod względem możliwości technicznych zabudowy otworów wiertniczych, chociaż z ekonomicznego punktu widzenia płytkie lokalizacje są bardziej uzasadnione. Głębokość stropu pokładowego złoża LGOM w rejonie Brzegu Głogowskiego wynosi od 1000 do 1200 m. Jakkolwiek istnieją możliwości techniczne eksploatacji zbiornika sprężonego powietrza na tej głębokości otworami z powierzchni ziemi, to jest ona utrudniona i związana ze znacznymi kosztami.

W związku ze zróżnicowanym stopniem rozpoznania poszczególnych struktur solnych, trudno jest w jednoznacznym stopniu ocenić ich przydatność do ługowania zbiorników pod względem jakości złoża.

W zakresie zewnętrznych kryteriów przydatności złóż soli do budowy zbiorników, jako najlepsze pod względem zaopatrzenia w wodę do ługowania są wysady: Łanięta, Lubień Kujawski, Izbica Kujawska i Kłodawa, które znajdują się we wschodniej części Pojezierza Kujawskiego i Pojezierza Gostynińskiego. Również obecnie eksploatowane otworami z powierzchni wysady: Góra i Mogilno mają czynną infrastrukturę do zasilania w wodę i zbytu solanki. Najbardziej niekorzystną lokalizację ma wysad Rogoźno, który znajduje się w dziale wodnym pomiędzy dorzeczem Wisły i Odry, a więc na terenie jednego z większych deficytów wody w Polsce. Cały obszar, na którym zlokalizowane są struktury wysadowe charakteryzuje się brakiem dogodnych miejsc zrzutu solanki. Jedynym rozwiązaniem jest więc jej utylizacja w komorach eksploatacyjnych kopalni Góra i Mogilno lub bezpośredni zbyt solanki nasyconej do zakładów chemicznych współpracujących z tymi kopalniami.

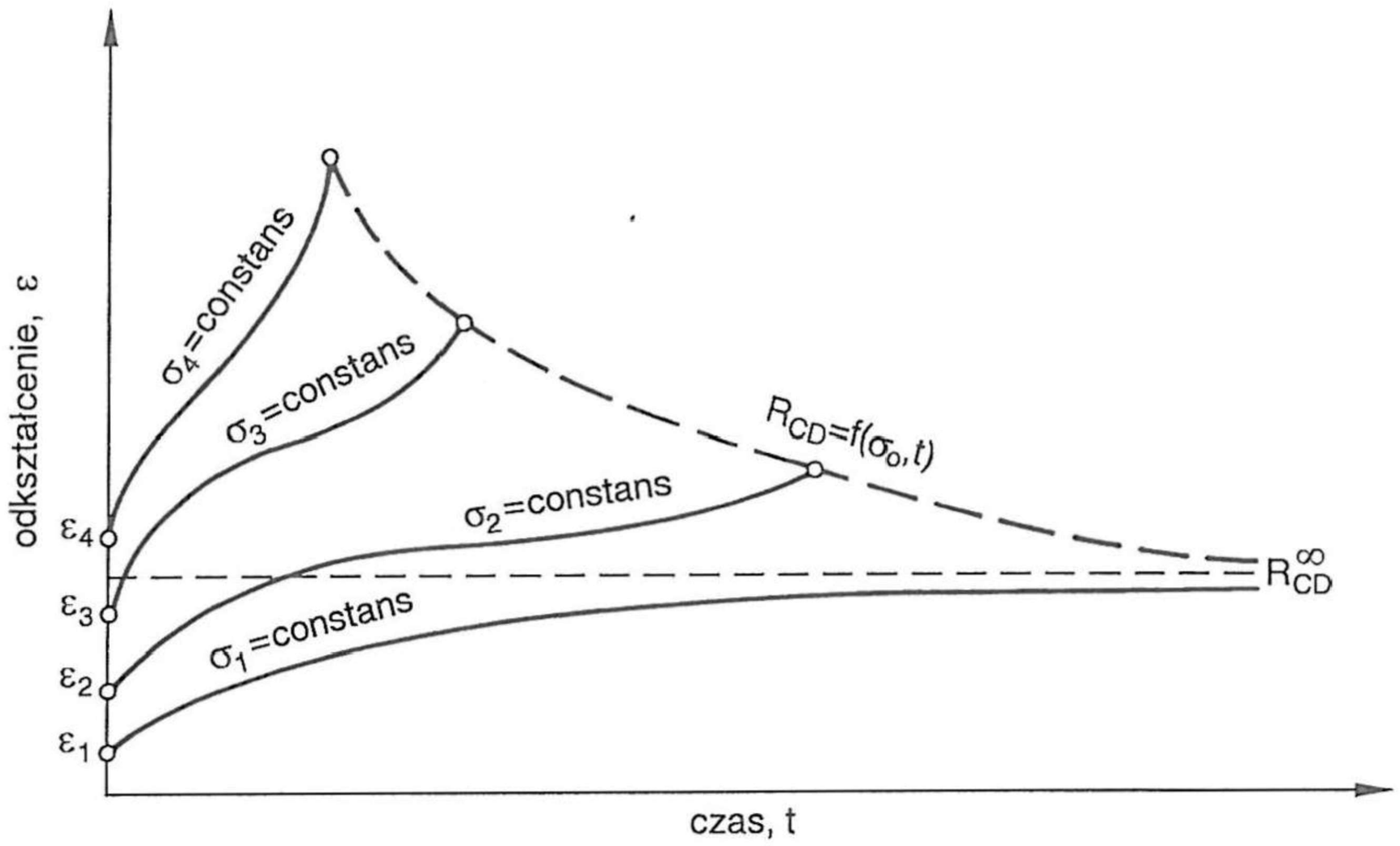
5. Geomechaniczny model górotworu solnego

Górotwór solny znajduje się pierwotnie w pewnym stanie równowagi, na który człowiek na ogół nie ma wpływu. Wkraczając z działalnością górniczą, zaburza się tą równowagę i prowokuje szereg zmian w stanie przemieszczeń i naprężeń. W celu prognozowania skutków takiej działalności, tworzy się różne modele, najchętniej w postaci możliwie prostej matematycznej formuły, stanowiącej mniej lub bardziej doskonałe odzwierciedlenie rzeczywistego górotworu i procesów w nich zachodzących. Model taki jest, w najogólniejszej postaci, funkcyjnym powiązaniem ze sobą składowych stanu naprężenia i odkształcenia z uwzględnieniem biegu czasu. Zależność taka jest funkcją wielu zmieniających się czynników, a wiążące je parametry, określane jako pewne własności górotworu, też w rzeczywistości nie są wielkościami stałymi. Z tego powodu budowa geomechanicznego modelu każdego ośrodka skalnego, także górotworu solnego, wymaga licznych badań, obserwacji i opisów wzajemnego wpływu na siebie jednej pary wielkości, przy ustabilizowanych na znanym poziomie pozostałych wartościach. W szczególności skonstruowanie geomechanicznego modelu górotworu solnego, mającego służyć projektowaniu podziemnych zbiorników na sprężone powietrze i prognozowaniu ich długotrwałej stateczności, wymaga realizacji specjalnie zaprogramowanych badań i weryfikacji ich wyników, uwzględniających specyfikę pracy tych podziemnych obiektów.

5.1. Własności soli kamiennej w badaniach laboratoryjnych

5.1.1. Długotrwała wytrzymałość soli kamiennej

Prognozowanie długotrwałej stateczności podziemnych magazynów sprężonego powietrza wymaga znajomości długotrwałej wytrzymałości górotworu solnego. Parametr ten powinien być określony w cyklu laboratoryjnych prób ściskania z różną prędkością obciążania, a więc z różnymi czasami trwania obciążenia, do czasu praktycznie nieskończonego włącznie (rys. 5.1). Wy-



Rys. 5.1. Fizykalna interpretacja długotrwałej wytrzymałości soli kamiennej

trzymałość po czasie nieskończenie długim, nazywana granicą długotrwałej wytrzymałości, ekstrapolowana z wyników prób laboratoryjnych, stanowi o wielkości naprężeń dopuszczalnych, których nie można przekroczyć w projektowanych caliznach ochronnych (warunek bezpieczeństwa). Nieliczne próby opisania długotrwałej wytrzymałości różnych gatunków soli kamiennej związkami liczbowymi [40], nie doprowadziły do powstania jednolitej teorii, a problem zależności naprężeń niszczących od czasu trwania obciążenia w dalszym ciągu określa się na drodze czysto doświadczalnej. Rezultaty tych badań określają długotrwałą wytrzymałość soli kamiennej w szerokim przedziale wartości: od 60 do 90 % wytrzymałości doraźnej na ściskanie, co czyni je mało przydatnymi do praktycznych obliczeń.

Z długotrwałą wytrzymałością soli kamiennej należy również związać pojęcie długotrwałej stateczności, rozumianej jako graniczny stan odkształcenia, przy którym projektowane wyrobisko traci swą funkcjonalność. Pojęcie to jest szczególnie istotne w odniesieniu do zbiorników sprężonego powietrza, które, pomimo że nie została przekroczona wartość wytrzymałości długotrwałej, mogą ulec tak znacznej konwergencji prowadzącej do zmniejszenia objętości, że stracą swą wartość jako akumulator powietrza dla elektrowni szczytowej.

Tak więc dla prognozowania długotrwałej stateczności podziemnych zbiorników w złożach soli kamiennej, bardzo istotnym zagadnieniem jest określenie jej charakterystyki deformacyjno-naprężeniowej.

5.1.2. Odkształcenie objętościowe jako miara zniszczenia struktury skały

Z laboratoryjnych badań własności wytrzymałościowych i odkształceniowych skał wynika, że na wyidealizowanej charakterystyce naprężeniowo-odkształceniowej, na którą składają się krzywe:

- odkształceń podłużnych,
- odkształceń poprzecznych,
- odkształceń objętościowych,

otrzymane z próby jedno- lub trójosiowego ściskania, można wyróżnić kilka charakterystycznych odcinków, opisujących poszczególne fazy procesu odkształcania się i niszczenia skały (rys. 5.2) [3]:

stadium nieliniowego odkształcania się skały (I)

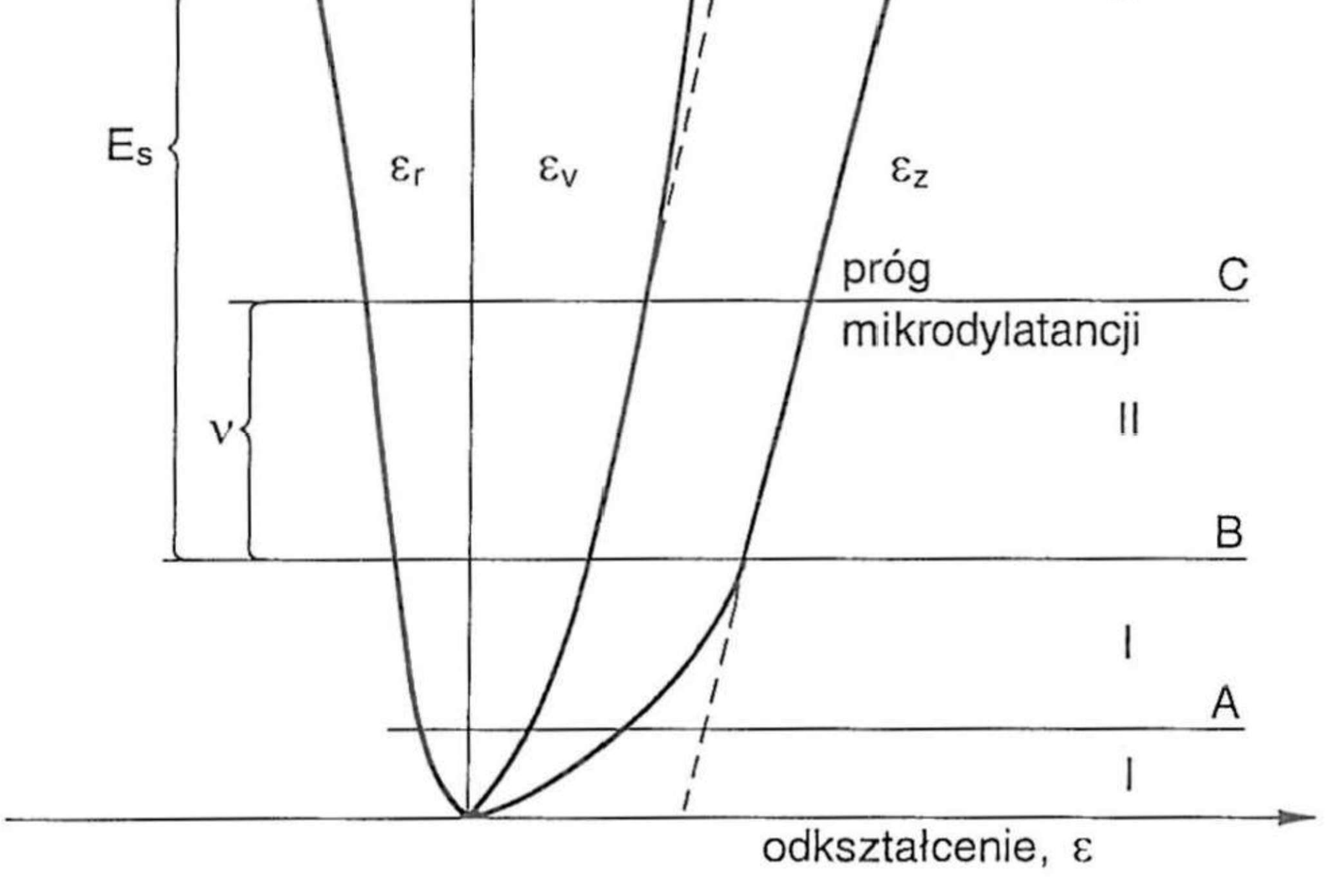
W stadium tym pod wpływem działania naprężenia osiowego następuje zamykanie się mikroszczelin. Objętość próbki maleje szybciej, niż należałoby oczekiwać na podstawie jej cech liniowo-sprężystych. Odkształcenie próbki jest tylko częściowo odwracalne. Wielkość krzywizny wykresu, wygiętego zwykle w kierunku osi odkształceń, zależy od gęstości skały, przy czym im skała jest bardziej zbita, tym krzywizna jest mniejsza.

stadium liniowego odkształcania się skały (II)

Stadium to odpowiada sprężystemu odkształcaniu się mineralnego szkieletu i ziaren skały, powodując, że wykresy odkształceń osiowych, poprzecznych i objętościowych są liniami prostymi.

stadium liniowości odkształceń podłużnych i nieliniowości odkształceń poprzecznych i objętościowych (III)

W stadium tym zostaje zapoczątkowany proces zniszczenia skały. Po przekroczeniu pewnego naprężenia granicznego zaczyna się propagacja istniejących w próbce mikroszczelin pierwotnych.



Rys. 5.2. Typowa charakterystyka odkształceniowa skał w laboratoryjnych próbach ściskania

stadium nieliniowego odkształcania się skały (IV)

Stadium to odpowiada zaawansowanemu procesowi stabilnej propagacji spękań. Odkształcenia podłużne tracą również swoją liniowość.

stadium nieliniowego odkształcania się skały (V)

W stadium tym następuje niestabilna już, niekontrolowana propagacja spękań, która prowadzi do zniszczenia. Objawem tego procesu jest anomalny wzrost objętości skały, nazywany dylatancją.

Poszczególne stadia procesu odkształcania się skały rozgraniczone są przez pewne wartości naprężeń, będące wielkościami charakterystycznymi dla danej skały:

A - próg liniowości odkształceń poprzecznych,
B - próg liniowości odkształceń podłużnych, poprzecznych i objętościowych; odtąd moduł sprężystości i współczynnik Poissona są stałe,
C - granica liniowości odkształceń poprzecznych i objętościowych; odtąd współczynnik Poissona rośnie przy stałym module sprężystości a objętość skały maleje wolniej, niż wynika to z liniowości odkształceń podłużnych. Jest to więc próg dylatacji względnej (względnego przyrostu objętości), nazywanej mikrodylatancją,
D - granica liniowości odkształceń podłużnych; odtąd moduł sprężystości i współczynnik Poissona tracą cechę parametrów ciała Hooke'a. Wielkości te jednak nadal charakteryzują własności odkształceniowe skały, przy czym współczynnik odkształcalności podłużnej maleje, a współczynnik odkształcalności poprzecznej rośnie,
E - próg dylatancji, dla którego współczynnik odkształcalności poprzecznej osiąga wartość 0,5; odtąd następuje bezwzględny przyrost objętości skały. Jest to więc próg dylatancji właściwej, czyli makrodylatancji,
F - granica wytrzymałości.

Jak wspomniano, próg mikrodylatancji jest zarazem naprężeniem inicjacji zniszczenia skały, chociaż proces propagacji spękań w tej fazie jest jeszcze procesem stabilnym. Z badań eksperymentalnych, przeprowadzonych na różnych skałach wynika, że wartości progu mikrodylatancji zawierają się, z nielicznymi wyjątkami, w przedziale od 30 do 60% wytrzymałości granicznej. Dotychczasowe wyniki badań wskazują, że wartości te są charakterystyczne dla danego rodzaju skały i nie zmieniają się zarówno w próbach jednoosiowego ściskania, jak i w trójosiowych [33].

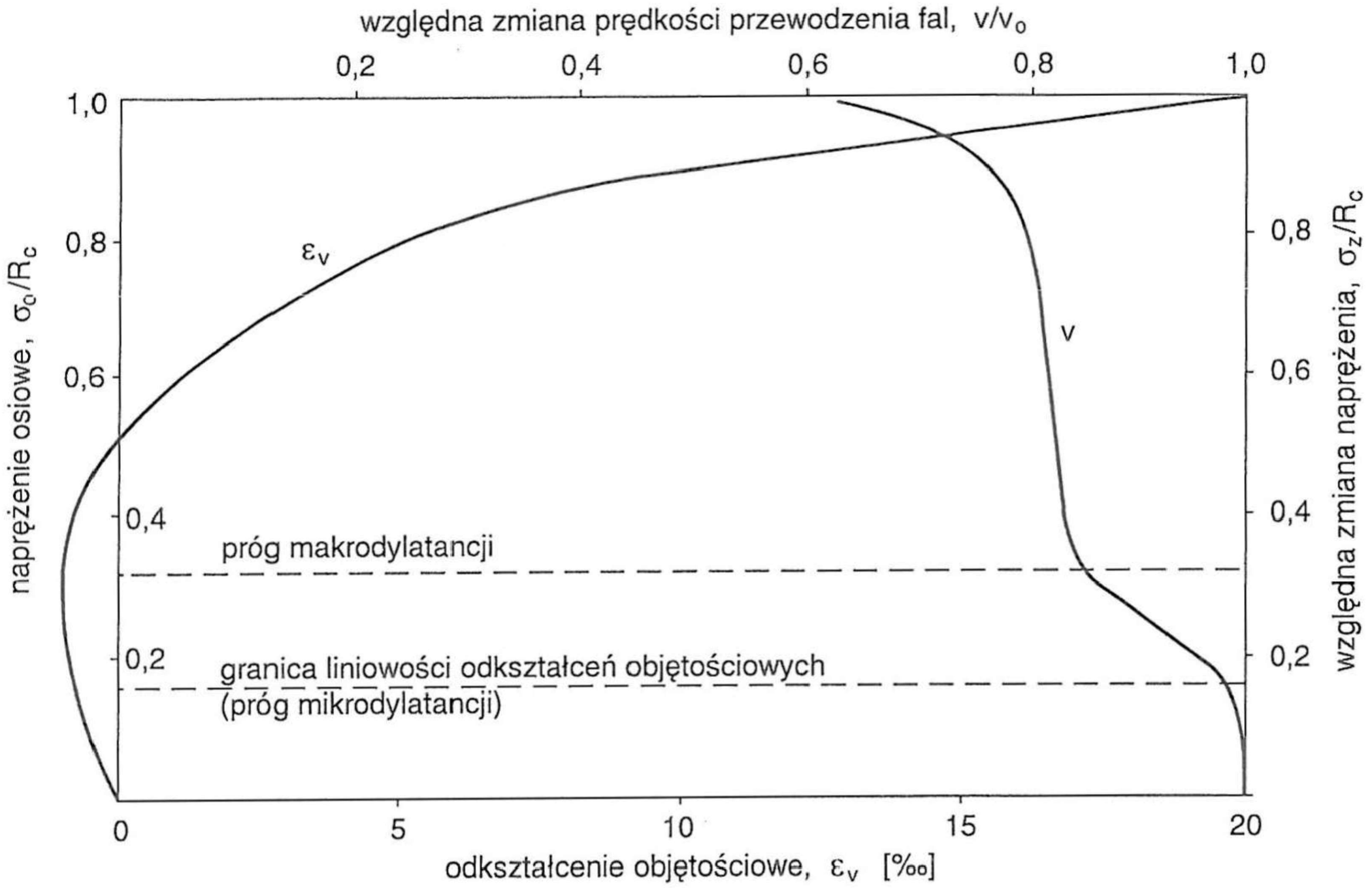
Proces propagacji spękań, zapoczątkowany przekroczeniem progu mikrodylatancji, przechodzi w niestabilny, samo podtrzymujący się proces, prowadzący bezpośrednio do makroskopowego zniszczenia skały, w wyniku wzrostu naprężeń i przekroczenia progu makrodylatancji. Przy tym właśnie naprężeniu objętość próbki skalnej osiąga najmniejszą wartość. Zjawisku makrodylatancji właściwy jest bezwzględny wzrost objętości skały, charakteryzujący się wartością współczynnika rozszerzalności poprzecznej większą od 0,5. Jak wynika z nielicznych badań laboratoryjnych, wartość progu makrodylatancji dla różnych skał mieści się w przedziale od 60 do 98 % granicy wytrzymałości. Jak stwierdzono w trakcie badań laboratoryjnych próbek soli kamiennej, pobranych ze złoża LGOM i wysadu Mogilno [4, 23], wartość progu makrodylatancji przy jednoosiowym ściskaniu stanowi dla tych soli około 30 % granicy wytrzymałości.

W pewnych warunkach prowadzenia doświadczeń, przy wysokim ciśnieniu i temperaturze oraz przy bardzo małych prędkościach odkształcenia, efekt makrodylatancji może w ogóle nie wystąpić. Świadczy to o przechodzeniu skały w tych warunkach ze stanu kruchego w stan plastyczny, ponieważ dylatancja związana jest jedynie z procesem kruchego pękania skały.

Na podstawie przytoczonych rozważań, analizując fizykalną istotę dylatancji, należy zauważyć, że progowi makrodylatancji można przypisać pewne znaczenie reologiczne [3], utożsa-

miając go z długotrwałą wytrzymałością skały. Prowadzące bowiem bezpośrednio do zniszczenia progresywne pełzanie skały następuje w wyniku przekroczenia pewnej krytycznej gęstości szczelin. Ponieważ dylatancja jest również pewną miarą gęstości szczelin, można więc uznać, że pełzanie progresywne zaczyna się po przekroczeniu pewnej wartości granicznej niesprężystego odkształcenia objętościowego. Próg dylatancji bezwzględnej stanowi krytyczną wartość naprężenia, powyżej której proces anomalnego wzrostu objętości jest procesem niestabilnym i nieodwracalnym.

Potwierdzeniem zmian dylatacyjnych przy wzrastającym obciążeniu próbek jest zmiana prędkości przechodzenia przez nie fal sprężystych, które, rejestrując zmiany gęstości ośrodka, są obrazem powstawania mikrospękań i postępującego niszczenia struktury skały (rys. 5.3).



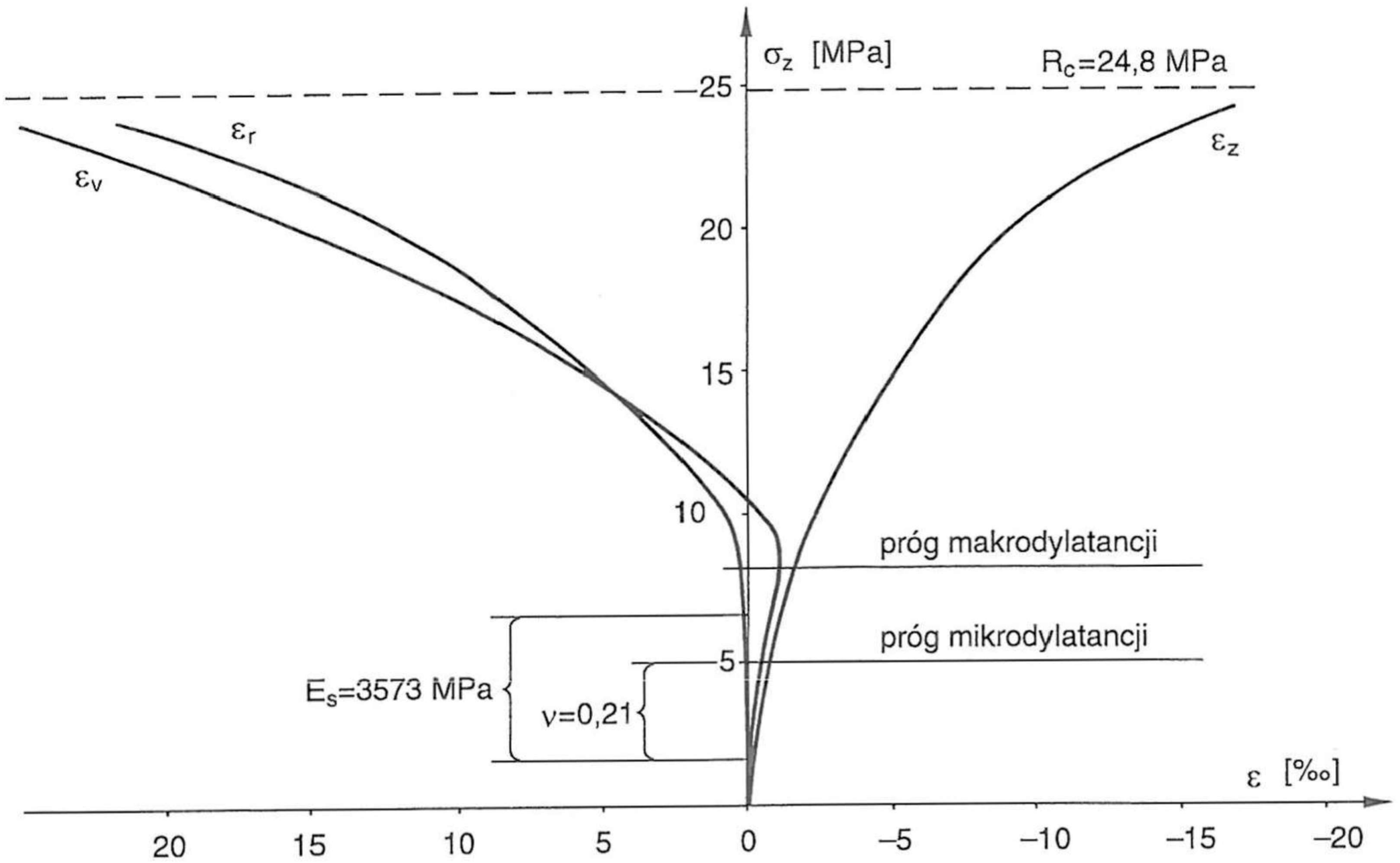
Rys. 5.3. Wykres zmian prędkości przewodzenia drgań sprężystych i odkształceń objętościowych w funkcji naprężeń w próbce soli kamiennej

5.1.3. Charakterystyka własności odkształceniowych soli kamiennej

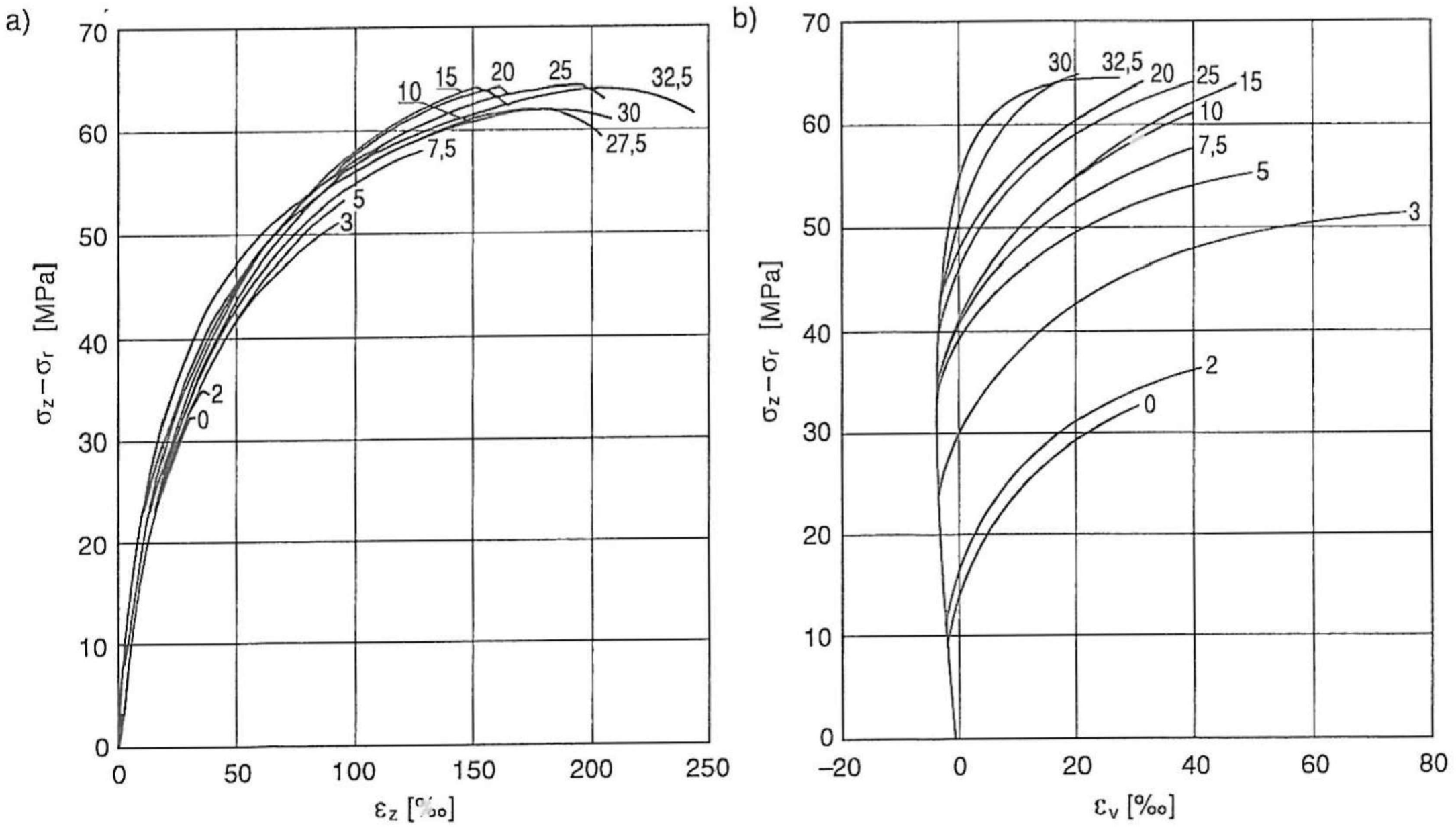
Na tle ogólnych uwag o przebiegu procesu odkształcania się skał można sformułować pewne szczegółowe spostrzeżenia o własnościach odkształceniowych soli kamiennej [4, 35]:

– badania laboratoryjne wykazują na ogół brak wstępnego stadium nieliniowości odkształceń osiowych i poprzecznych, zarówno przy ściskaniu jednoosiowym (rys. 5.4) jaki i trójosiowym (rys. 5.5). Świadczy to o małej porowatości badanej soli kamiennej; faza zaciskania pierwotnych mikrospękań nie występuje; całkowite obciążenie przejmuje szkielet krystaliczny, odkształcając się w sposób liniowy.

– charakterystyki deformacyjno-naprężeniowe, otrzymane przy różnych wartościach ciśnień otaczających, wskazują na nieliniowy związek między odkształceniami i naprężeniami na ogół w prawie całym przedziale obciążeń pionowych.



Rys. 5.4. Charakterystyka deformacyjno-naprężeniowa soli kamiennej w laboratoryjnej próbie jednoosiowego ściskania



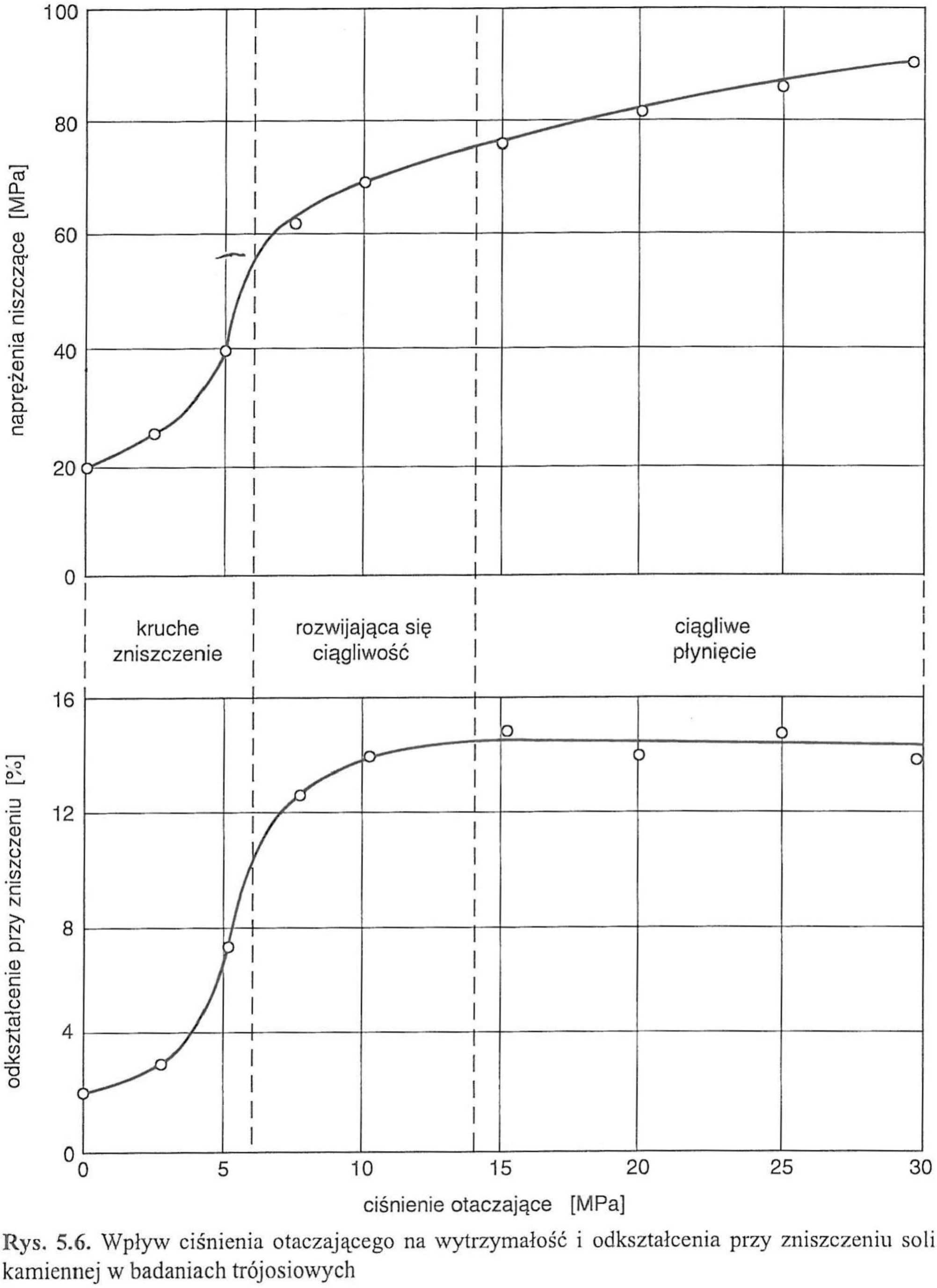
Rys. 5.5. Charakterystyki deformacyjno-naprężeniowe soli kamiennej w próbach trójosiowego ściskania: a) – odkształcenie osiowe, b) – odkształcenie objętościowe

- granica liniowości odkształceń objętościowych występuje przy znacznie niższych wartościach naprężeń, niż stwierdzono to dla innych skał. Próg mikrodylatancji mieści się w przedziale od 4 do 5 MPa, co stanowi najwyżej 20 % naprężeń niszczących w próbach jednoosiowego ściskania. W tym przedziale naprężeń uzasadnione jest określanie współczynnika Poissona, który ma tu wartość 0,21– znacznie niższą od wartości tradycyjnie określanego dla soli kamiennej współczynnika odkształcalności poprzecznej.
- granica liniowości odkształceń podłużnych występuje przy naprężeniach równych 25 – 30% naprężeń granicznych w próbach jednoosiowych. Moduł sprężystości określony w tym przedziale ma wartość ok. 3,6 GPa.
- w miarę wzrostu ciśnienia otaczającego rośnie wartość naprężeń niszczących, przy czym największy, bo prawie dwukrotny, przyrost został zaobserwowany w przedziale do 5MPa. Przy dalszym wzroście ciśnień otaczających, intensywność przyrostu wartości naprężeń niszczących maleje.
- próg makrodylatancji, określający bezwzględny przyrost odkształcenia objętościowego ma wartość znacznie mniejszą niż stwierdzono to dla innych skał i występuje przy naprężeniach od 30 do 35 % wytrzymałości soli kamiennej na jednoosiowe ściskanie. W miarę wzrostu ciśnienia otaczającego makrodylatancja pojawia się przy większych wartościach naprężeń osiowych i osiąga około 65 % naprężeń niszczących przy ciśnieniu 30 MPa. Najbardziej intensywny przyrost wartości progu makrodylatancji obserwuje się również w przedziale ciśnień otaczających do 5 MPa.
- powyżej progu makrodylatancji wzrostowi naprężeń towarzyszy znaczny przyrost odkształceń poprzecznych i objętościowych, będących objawem postępującej dezintegracji struktury soli. W miarę przyrostu naprężeń współczynnik odkształcalności podłużnej maleje, a współczynnik odkształcalności poprzecznej nadal rośnie.

Mimo pojawienia się inicjacji spękań przy stosunkowo małych wartościach naprężeń, sól kamienna jest zdolna do przenoszenia znacznie większych obciążeń. Wyraźne kruche zniszczenie, objawiające się prawie całkowitą dezintegracją struktury próbek soli, obserwowano w przedziale ciśnień do 5MPa [14]. Przy większych ciśnieniach radialnych za naprężenie niszczące przyjmowano wartość naprężenia osiowego, przy którym następował gwałtowny wzrost prędkości odkształceń osiowych. Próbki niszczone przy ciśnieniach otaczających większych od 5 MPa nie ulegały rozpadowi, a efekt zniszczenia można było ocenić makroskopowo jako zmianę zabarwienia i zmętnienie kryształów.

Pomiar konwergencji próbek, mierzonej odkształceniem objętościowym przy równomiernie zadawanym ciśnieniu hydrostatycznym, wykazuje intensywny ubytek objętości w przedziale ciśnień do 5 MPa. Przy dalszym ściskaniu hydrostatycznym konwergencja ma charakter zanikający. Zaobserwowany efekt, towarzyszący zmianie gęstości występowania pierwotnych mikroszczelin w badanym materiale, ma niewątpliwy związek z rejestrowanymi zmianami własności deformacyjnych soli kamiennej.

Należy w tym miejscu zwrócić uwagę na fakt, że w miarę wzrostu wartości składowych tensora naprężeń, charakter ośrodka solnego ulega zmianie. W miejsce kruchego pękania pojawia się zniszczenie plastyczno-kruche i stan rozwijającej się ciągliwości (rys. 5.6).



Rys. 5.6. Wpływ ciśnienia otaczającego na wytrzymałość i odkształcenia przy zniszczeniu soli kamiennej w badaniach trójosiowych

Przebieg charakterystyk deformacyjno-naprężeniowych próbek soli kamiennej sugeruje, że w zakresie wyższych wartości naprężeń powinien mieć miejsce stan plastycznego płynięcia skały solnej [25]. Jednakże rejestrowane efekty dylatacyjne, pojawiające się w całym zakresie ciśnień podczas szczegółowych badań trójosiowych próbek soli z LGOM, nie dały podstaw do podjęcia prób formułowania warunku plastyczności dla soli kamiennej.

Fakt ten upoważnia do stwierdzenia, że gdyby za kryterium długotrwałej wytrzymałości soli kamiennej przyjąć wartość progu makrodylatancji [3], to w zakresie ciśnień panujących w górotworze w obszarze lokalizacji zbiorników sprężonego powietrza, zawsze może zaistnieć sytuacja, w której koncentracja naprężeń zainicjuje propagację kruchego zniszczenia górotworu. Skutecznym środkiem zapobiegania takim stanom jest projektowanie i wykonywanie podziemnych komór o optymalnych, ze względu na koncentrację naprężeń, kształtach.

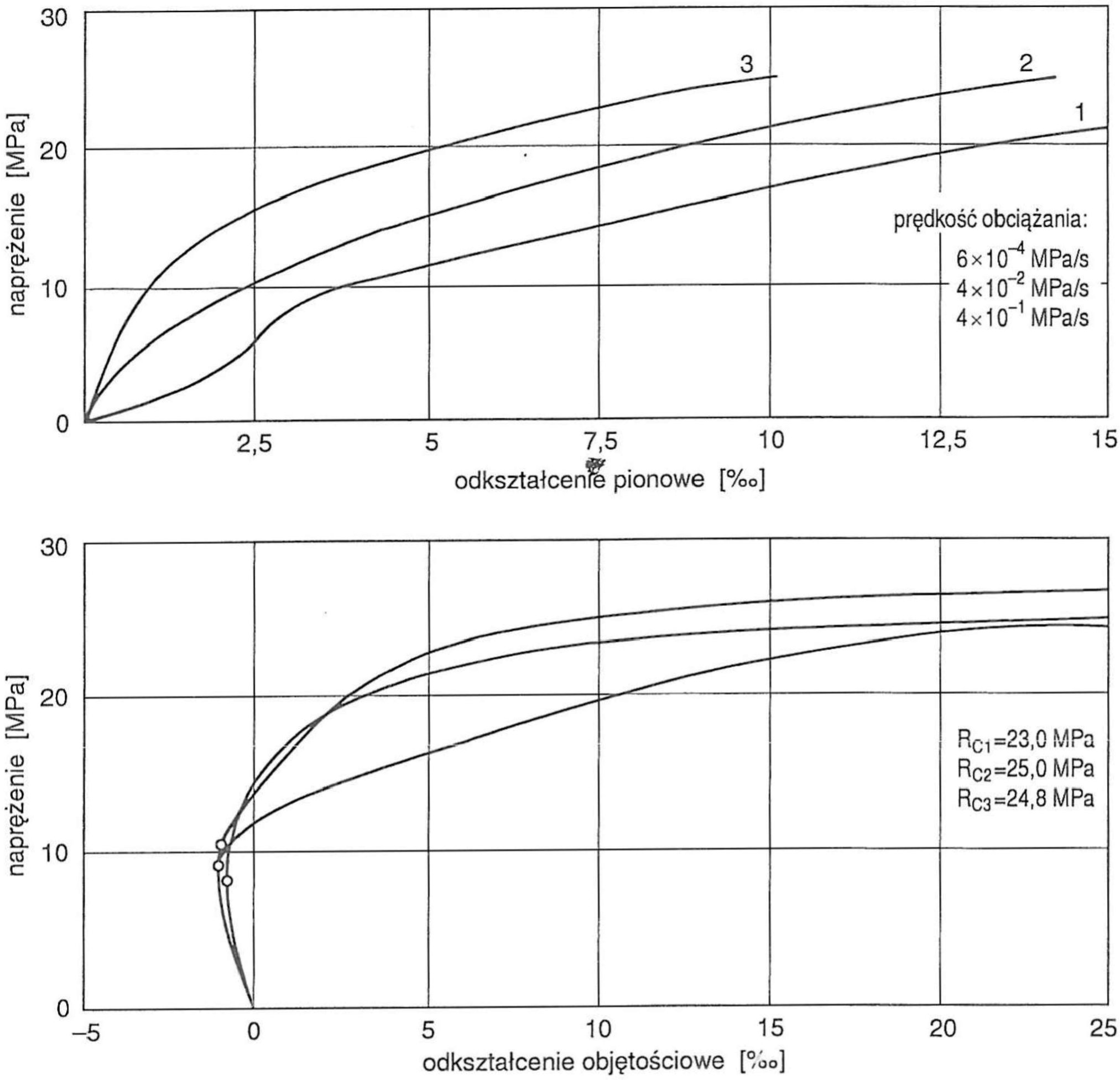
Z przedstawionych badań laboratoryjnych wynika również praktyczne spostrzeżenie o własnościach odkształceniowych soli kamiennej. Rejestrowane, duże wartości odkształceń, zwłaszcza towarzyszące rozwijającej się ciągliwości skały wskazują, że o funkcjonalności podziemnych zbiorników sprężonego powietrza decydować może krytyczna wielkość przemieszczeń, określona względami ekonomicznymi.

5.1.4. Wpływ prędkości obciążania na własności wytrzymałościowe

Rytm zapotrzebowania na moc szczytową w systemie energetycznym wymaga systematycznych zmian ciśnienia we współpracującym z turbiną gazową zbiorniku powietrza. Proces magazynowania odpowiedniej ilości powietrza polega na zatłoczeniu go do podziemnej komory i sprężeniu do ciśnienia maksymalnego, którego wartość jest podyktowana przede wszystkim wymogami turbiny gazowej. Zgodnie z omówioną charakterystyką pracy turbiny (rozdział 2), czas trwania zatłaczania powietrza wynosi od 6 do 8 godzin, a zmiana ciśnienia od 7,0 do 10,5 MPa, w przypadku normalnej pracy turbiny, lub od 4,2 do 10,5 MPa po pracy interwencyjnej. Z podobną prędkością, około 0,5 MPa/godz., zmienia się ciśnienie powietrza podczas pracy szczytowej turbiny. W tym czasie, w otaczającym zbiornik górotworze zachodzą zmiany w stanie naprężeń i przemieszczeń, zgodnie z rzeczywistą charakterystyką deformacyjno-naprężeniową górotworu solnego. Należy zatem ocenić, jak prędkość zachodzenia tych zmian wpływa na stan soli kamiennej i jej własności wytrzymałościowe.

W badaniach laboratoryjnych próbek soli kamiennej poddanych jednoosiowemu ściskaniu z różnymi prędkościami (rys. 5.7), uzyskano charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowe, które wskazują na brak istotnego wpływu prędkości obciążania na wartość naprężeń niszczących w granicach zastosowanych prędkości. Otrzymane wyniki mieszczą się w przedziale zmienności poszczególnych oznaczeń. Nieco większy wpływ prędkości obciążania można zaobserwować dla odkształceń osiowych i objętościowych: im wolniej obciążana jest próbka, tym większych doznaje odkształceń. Względny przyrost objętości przy różnych prędkościach obciążania ma podobny charakter, a wartość progu makrodylatancji nieznacznie wzrasta wraz ze wzrostem prędkości obciążeń.

Należy zauważyć, że sprężanie powietrza w zbiorniku zachodzi z prędkościami mniejszymi od stosowanych w badaniach, przy czym rzeczywista prędkość zmian składowych stanu naprężenia w każdym punkcie otaczającego zbiornik górotworu w ogólnym przypadku nie musi być równoważna prędkości zmian ciśnienia w zbiorniku. Można zatem stwierdzić, że w zakresie zmian ciśnienia powietrza stosowanych przy zasilaniu turbiny gazowej, wpływ ten na własności deformacyjno-wytrzymałościowe soli kamiennej jest w praktyce jest nieistotny.



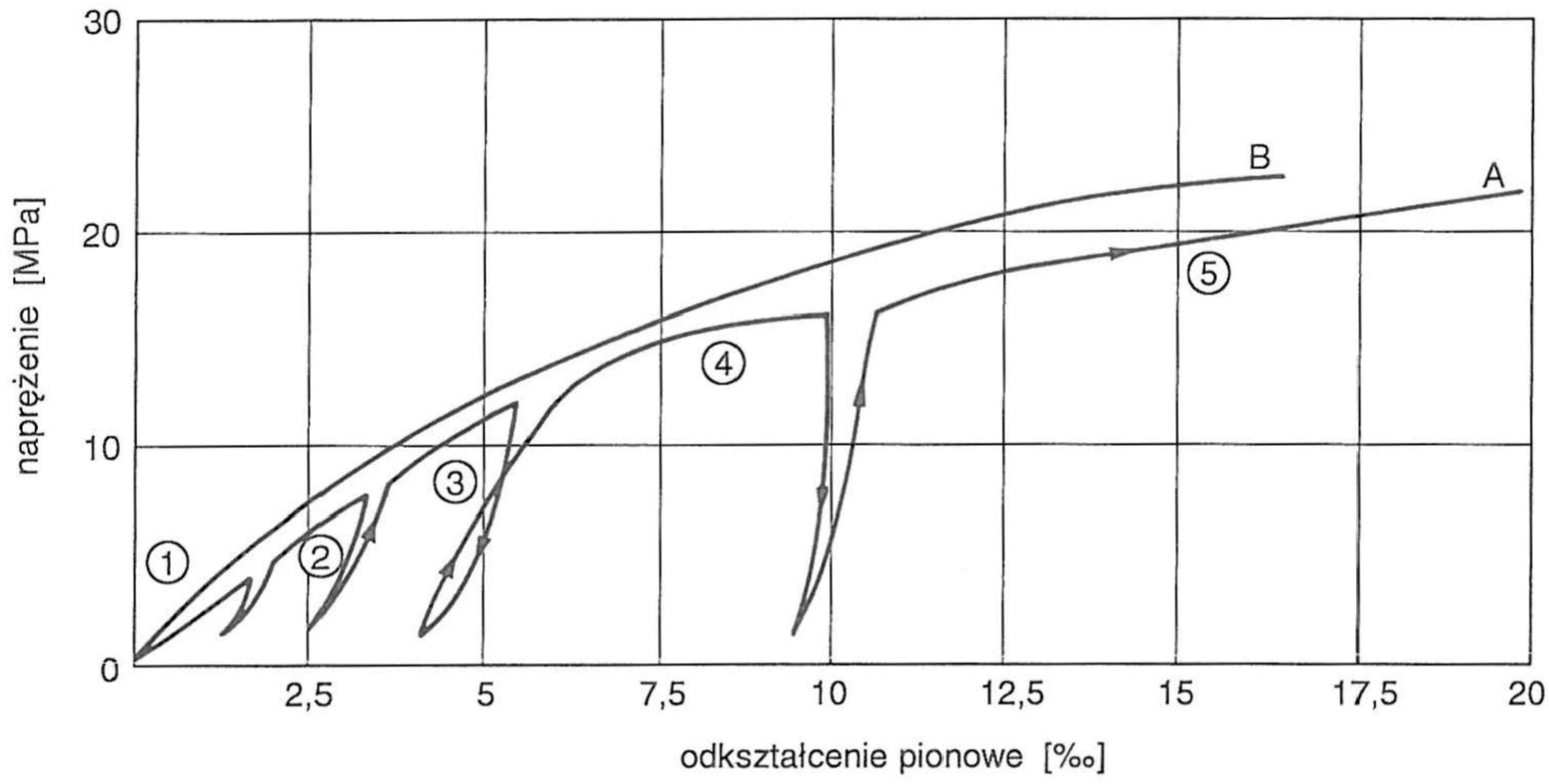
Rys. 5.7. Wpływ prędkości obciążania na własności wytrzymałościowe i deformacyjne soli kamiennej

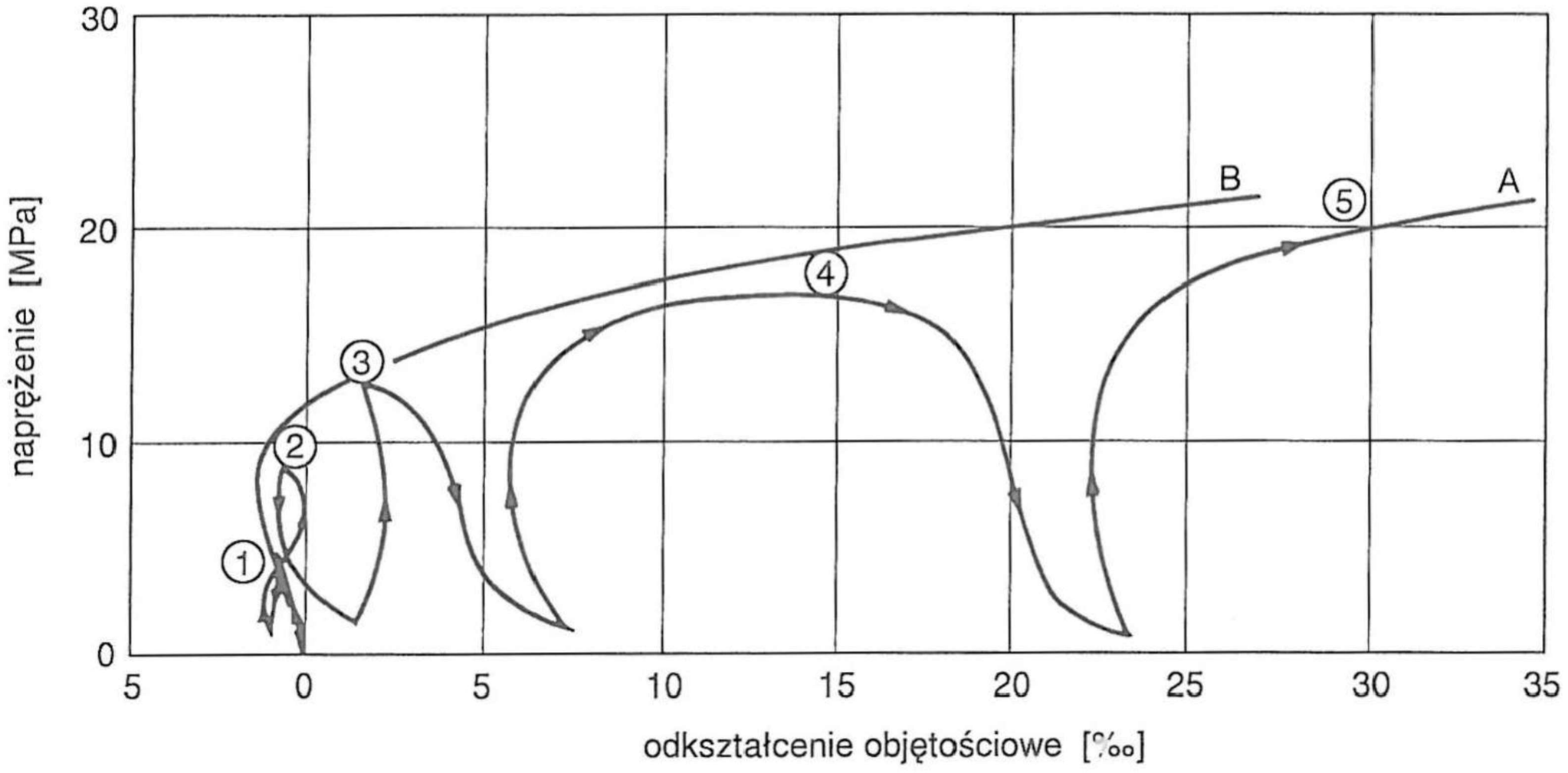
5.1.5. Wpływ cyklicznego obciążania i odciążania na wytrzymałość

Z zagadnieniem dobowego cyklu pracy elektrowni szczytowo-akumulacyjnej wiąże się również problem związku własności deformacyjno-wytrzymałościowych soli kamiennej z procesem cyklicznej zmiany wartości składowych naprężeń. W warunkach laboratoryjnych wpływ ten można ocenić w badaniach cyklicznego obciążania i odciążania próbek soli kamiennej przy jednoosiowym ściskaniu (rys. 5.8).

Jednoosiowa próba „obciążanie-odciążanie" jest typowym badaniem służącym do określania udziału odkształceń sprężystych w całkowitych odkształceniach, których doznaje próbka pod różnymi obciążeniami. Może być zatem wykorzystana do oceny stopnia odwracalności także i odkształceń objętościowych. Jak pokazano na rysunku, jedynie w pierwszym cyklu obciążenia, poniżej wartości progu mikrodylatancji, odkształcenie objętościowe ma charakter liniowy i jest częściowo odwracalne. W cyklu drugim, przy obciążeniu niższym od wartości progu makrodyla-

tancji w próbie jednostopniowego ściskania (krzywa B), pojawia się dylatancyjny przyrost objętości próbki. W cyklu drugim i trzecim, przy postępującej dylatancji, ma miejsce swoistego rodzaju opóźnienie reakcji odkształceń objętościowych na zmieniające się obciążenie, by w następnych cyklach: czwartym i piątym, przejść w ciągły wzrost objętości, pomimo występowania fazy odciążania.





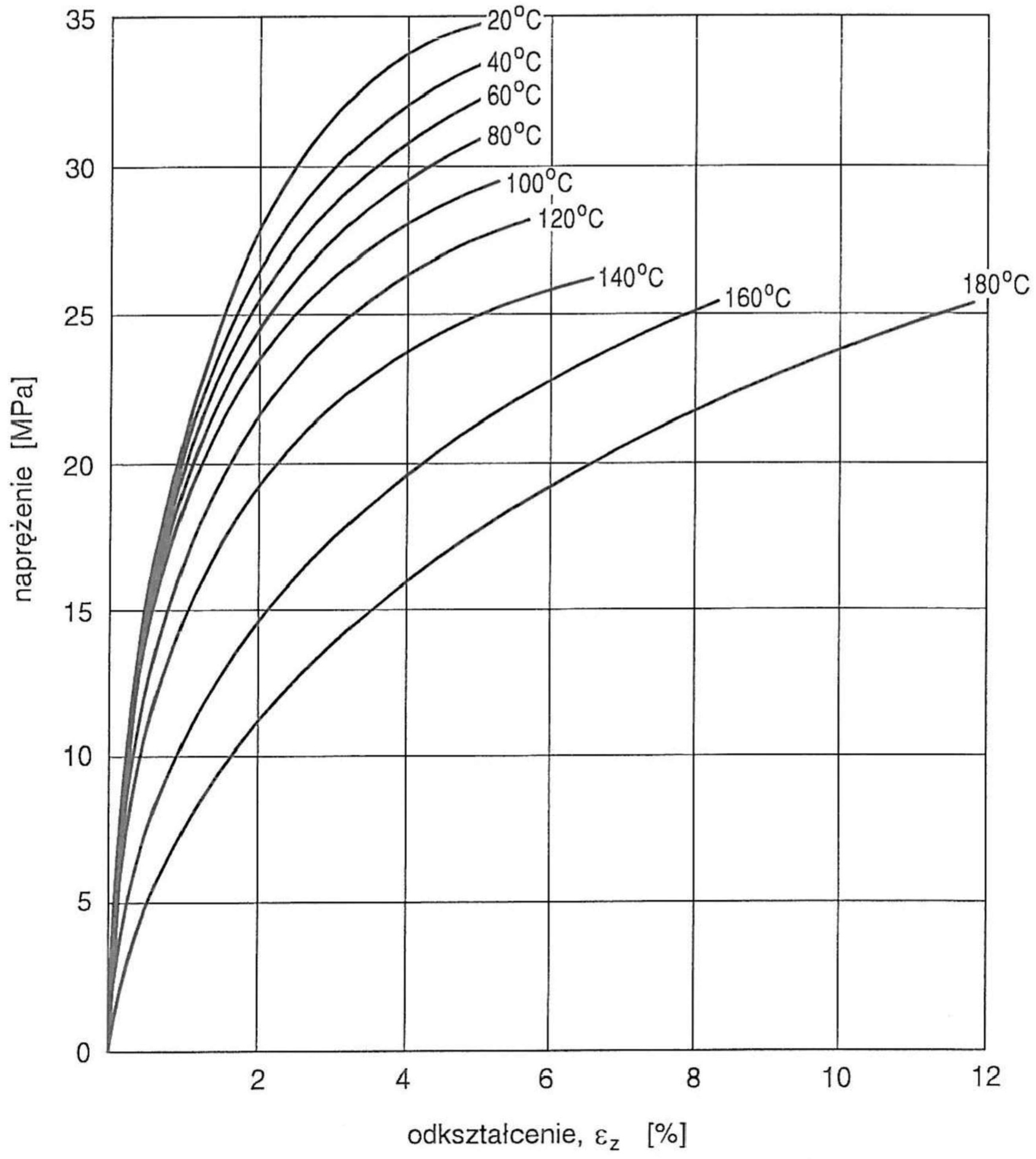
Rys. 5.8. Przebieg charakterystyki deformacyjno-naprężeniowej soli kamiennej przy cyklicznym obciążaniu i odciążaniu (A) oraz przy obciążaniu jednokrotnym (B)

Natomiast nie stwierdzono istotnego wpływu, w stosowanym w badaniach zakresie, cyklicznych zmian stanu naprężenia na wartość końcowych naprężeń niszczących. Spostrzeżenie to nie może być jednak podstawą do sformułowania obligatoryjnego wniosku o takiej własności soli kamiennej, bowiem zrealizowane badania nie wyczerpały możliwej do zastosowania w tym problemie metodyki badawczej.

Z punktu widzenia stateczności podziemnych zbiorników sprężonego powietrza można stwierdzić, że dobowe zmiany stanu naprężenia w otaczającym górotworze, zachodzące w niewielkim zakresie wartości, są na tyle powolne, by nie spowodować gwałtownych zmian własności wytrzymałościowych górotworu solnego. Jednakże należy mieć na uwadze istotną zmianę własności deformacyjnych, co powinno znaleźć odwzorowanie w formule geomechanicznego modelu górotworu. Ta własność soli kamiennej jest bowiem istotnym elementem rzutującym na długotrwałą stateczność podziemnych zbiorników sprężonego powietrza w aspekcie ich użytecznej objętości.

5.1.6. Wpływ temperatury na własności wytrzymałościowe

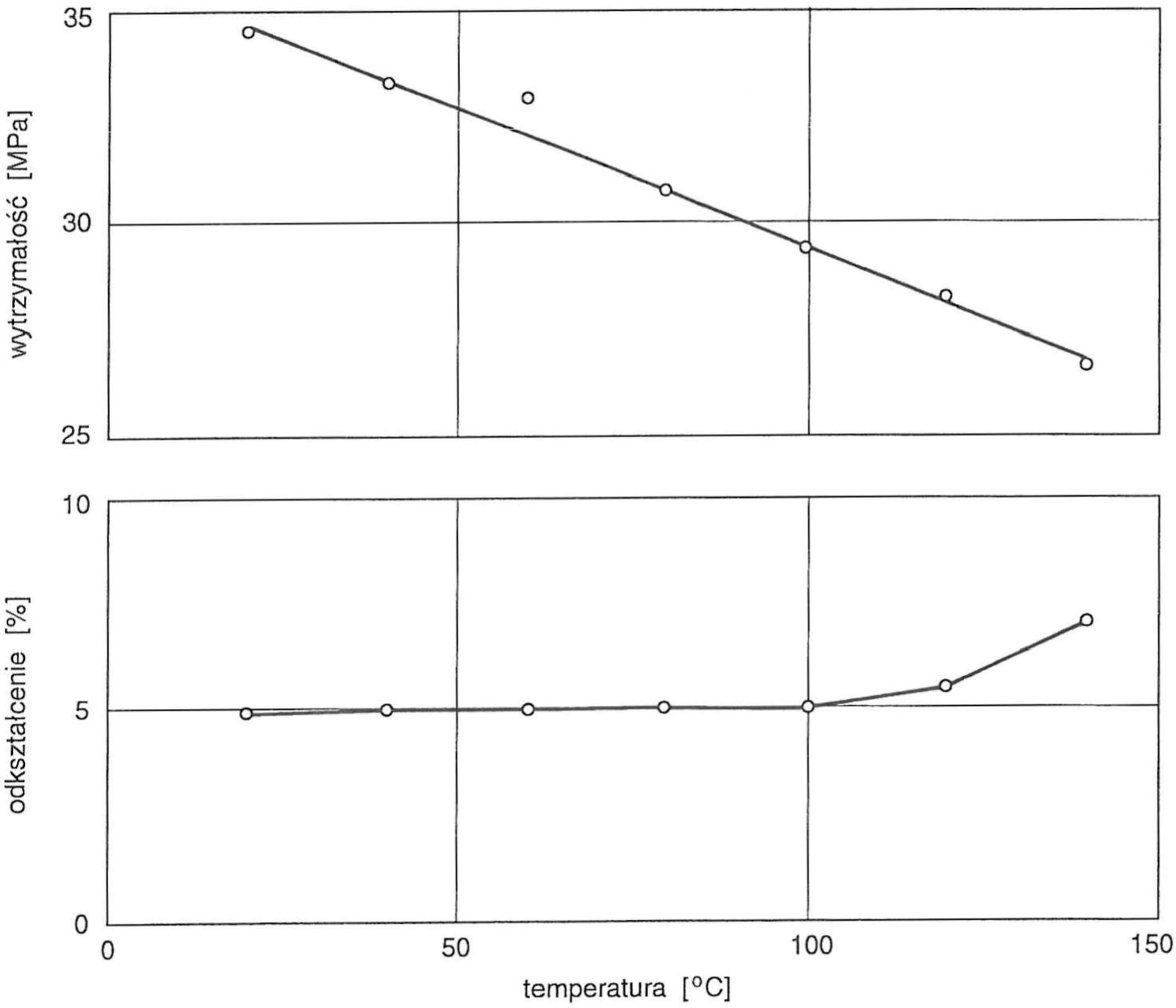
Badania naukowe uzyskane w różnych laboratoriach [45] dowodzą, że wzrost temperatury próbek soli kamiennej, poddanych próbie jednoosiowego ściskania, powoduje kilkuprocentowy spadek ich wytrzymałości oraz wzrost ich odkształcalności nawet o kilkadziesiąt procent (rys. 5.9). W badaniach reologicznych następuje zwiększenie prędkości pełzania i zmiana jego charak-



Rys. 5.9. Wpływ temperatury na przebieg charakterystyk deformacyjno-naprężeniowych soli kamiennej

teru z pełzania ustabilizowanego na pełzanie nieustalone. Stwierdzono zróżnicowany wpływ podwyższonej temperatury na wielkość krytycznych naprężeń niszczących, zależnie od zakresu temperatur:

- w przedziale temperatur od 20 do 160°C, utrata stateczności soli kamiennej przyjmuje formę kruchego zniszczenia, przy czym wraz ze wzrostem temperatury, wytrzymałość na ściskanie liniowo maleje, a wartość odkształceń przy zniszczeniu nieznacznie wzrasta w temperaturach bliższych prawej granicy przedziału (rys. 5.10),
- w przedziale temperatur od 160 do 220°C wytrzymałość badanej soli liniowo wzrasta,
- w przedziale od 220 do 300°C ponownie liniowo maleje, przy czym pojawiają się duże przyrosty odkształceń ciągłych, zmieniających charakter zniszczenia soli,
- przy temperaturach powyżej 300°C, wytrzymałość nadal liniowo maleje, przy czym wartością naprężeń granicznych jest tutaj naprężenie, przy którym pojawia się efekt plastycznego płynięcia soli.



Rys. 5.10. Wpływ temperatury na wytrzymałość i odkształcenie przy zniszczeniu próbek soli kamiennej

Przytoczone wyniki badań nie uwzględniają pełnej charakterystyki deformacyjnej soli kamiennej, poza analizą odkształceń osiowych przy zniszczeniu [45].

Należy pamiętać, że sól kamienna zawiera w swych porach pewne ilości uwięzionej solanki. W związku z tym wraz ze wzrostem temperatury następuje wzrost ciśnienia porowego i uwalnianie się par solanki. Powoduje to powstawanie wewnętrznych mikrospękań, a więc zwielokrotnienie efektu dylatancyjnego, co może stanowić wytłumaczenie obniżonej wytrzymałości soli kamiennej nawet w stosunkowo niskich temperaturach, a zarazem stwarzać niebezpieczeństwo zapoczątkowania procesu propagacji spękań górotworu, nawet przy małych wartościach naprężeń.

W wyniku przeprowadzonych wcześniej rozważań na temat przemian termodynamicznych zachodzących w zbiorniku sprężonego powietrza, stwierdzono, że maksymalna temperatura magazynowanego powietrza nie przekroczy 48°C. W tym zakresie temperatur badania laboratoryjne nie stwierdziły istotnych zmian w zachowaniu się soli kamiennej, zatem przy konstrukcji geomechanicznego modelu górotworu solnego ten czynnik można pominąć.

5.2. Doświadczalne kryterium zniszczenia górotworu solnego

Powszechnie przyjmuje się, że w złożonym stanie naprężenia zniszczenie opisuje pewna funkcja stanu naprężenia:

$$F(\sigma_{ij}) = 0 \tag{5.1}$$

gdzie σ_{ij} są składowymi tensora naprężenia. W przypadku soli kamiennej, traktowanej jako materiał izotropowy, warunek ten jest skalarną funkcją stanu naprężenia, a zatem jej postać nie zależy od obrotu układu współrzędnych. Warunek stanu granicznego można zapisać w naprężeniach głównych następująco:

$$F_1(\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3,) = 0 \tag{5.2}$$

lub w jednej z dwóch postaci:

$$F_2(I_1,I_2,I_3) = 0 \qquad F_3(J_1,J_2,J_3) = 0 \tag{5.3}$$

gdzie: I_1, I_2, I_3 są niezmiennikami tensora naprężeń, a J_1, J_2, J_3 – niezmiennikami dewiatora naprężeń.

Równania (5.3) określają w przestrzeni naprężeń głównych pewną powierzchnię graniczną. Powinna ona obejmować początek układu współrzędnych oraz ograniczać obszar wypukły, to znaczy powinna spełniać warunek, że każdy odcinek łączący dwa punkty tego obszar lub jego brzegu należy również do tego obszaru lub brzegu.

Warunek wytrzymałościowy, opisujący określoną powierzchnię graniczną w przestrzeni naprężeń głównych oznacza, że stan naprężenia reprezentowany przez współrzędne punktów leżących wewnątrz tej powierzchni nie powoduje zniszczenia skały. Przy stanie naprężenia, opisanym współrzędnymi punktów leżących na brzegu powierzchni granicznej, skała ulega zniszczeniu.

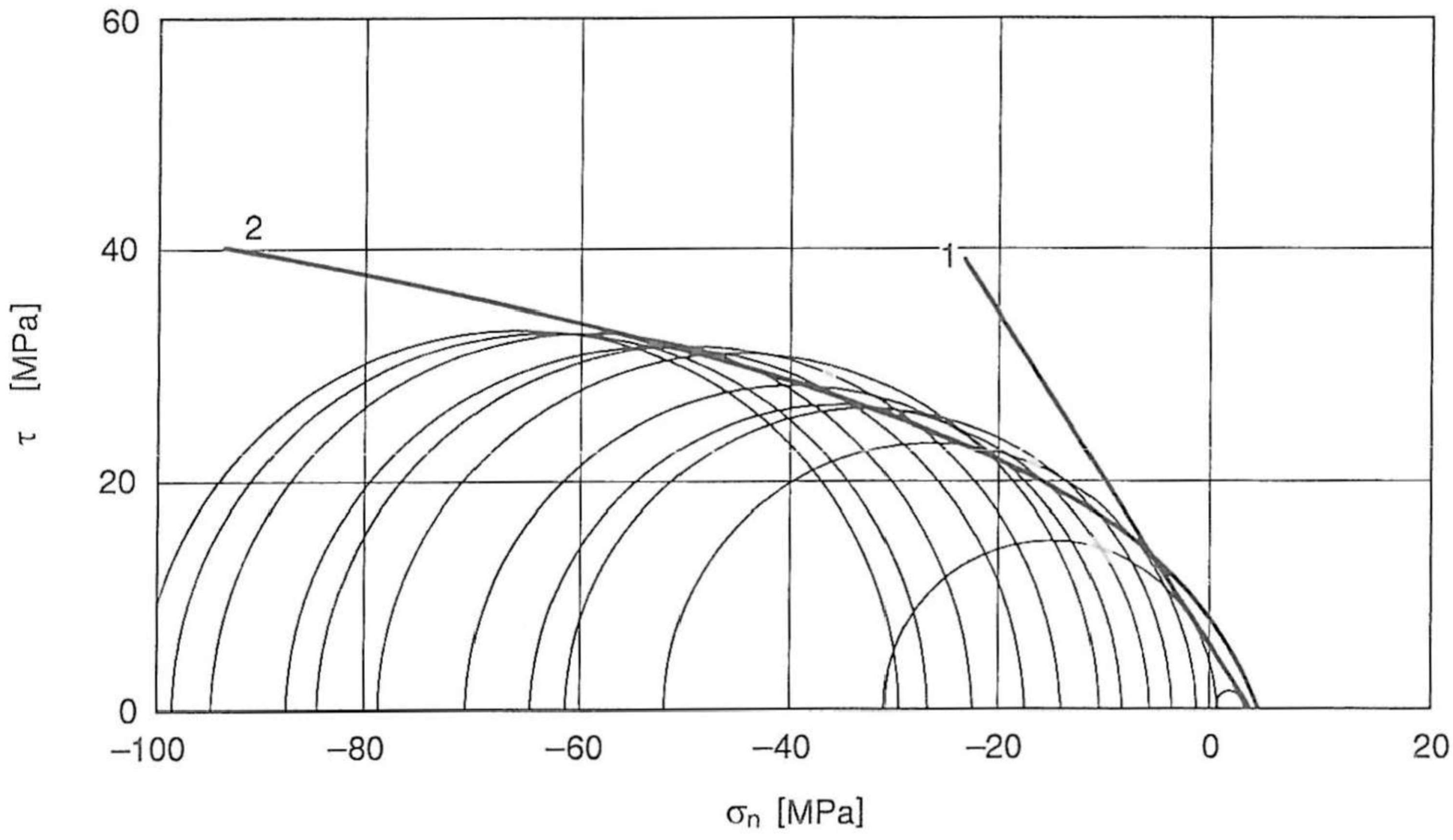
Dobierając dla soli kamiennej warunek wytrzymałościowy, należy uwzględnić następujące wymagania:

– warunek powinien być zgodny z wynikami doświadczeń,

– powinien zawierać niewielką liczbę łatwo wyznaczalnych parametrów,

– w przestrzeni naprężeń głównych powinien opisywać wypukłą powierzchnię graniczną.

Określenie jednoznacznego warunku wytrzymałościowego dla soli kamiennej jest stosunkowo trudne [12]. Z analizy wyników badań trójosiowych próbek soli z wysadu Mogilno i z pokładowego złoża LGOM wynika, że liniowe warunki wytrzymałościowe można stosować tylko do odpowiednio niskiego poziomu naprężeń. Stosunkowo dobrą zgodność opisu powierzchni granicznej przy ciśnieniach otaczających do 5MPa można uzyskać, stosując warunek Coulomba-Mohra lub warunek Mohra o równaniu paraboli (rys. 5.11).



Rys. 5.11. Warunki równowagi granicznej dla soli kamiennej na płaszczyźnie ($\sigma - \tau$):
1 – Coulomba-Mohra, 2 – Mohra o równaniu paraboli

Warunek Coulomba-Mohra zakłada liniową postać funkcji Mohra:

$$q - p\sin\varphi - k\cos\varphi = 0 \tag{5.4}$$

lub

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)\sin\varphi - k\cos\varphi = 0 \tag{5.5}$$

gdzie:

k – kohezja,

φ – kąt tarcia wewnętrznego.

Przechodząc do równania obwiedni, otrzymujemy klasyczną postać warunku Coulomba:

$$\tau = k - \rho\,\mathrm{tg}\varphi \tag{5.6}$$

Na płaszczyźnie naprężeń (σ,τ) warunek (5.6) stanowi prostoliniową obwiednię kół Mohra. Jest on podstawowym warunkiem stosowanym w mechanice gruntów i skał. Wynika z niego, że

stosunek pomiędzy wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie a wytrzymałością na jednoosiowe rozciąganie wynosi:

$$\frac{R_c}{R_r} = \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} \tag{5.7}$$

Stosując warunek Coulomba-Mohra do opisu zachowania się badanych soli (rys.5.11), otrzymuje się następujące wartości parametrów:

kąt tarcia wewnętrznego 55,9°,

kohezja 4,37 MPa.

Zatem z wzoru (5.7) wynika stosunek wytrzymałości równy 5,8. Wyliczona wartość zdecydowanie różni się od rzeczywistego stosunku z badań laboratoryjnych, który przeciętnie wynosi około 21.

Warunek Mohra o równaniu paraboli opisuje funkcja:

$$\sigma = b - \alpha\tau^2 \tag{5.8}$$

gdzie:

a,b – są dodatnimi stałymi wartościami, a parametr b odpowiada wytrzymałości skal na hydrostatyczne rozciąganie.

Dla badanych soli kamiennych warunek ten przyjmuje postać:

$$q^2 = 17{,}886\ p + 80{,}478 \tag{5.9}$$

co odpowiada obwiedni kół Mohra

$$\sigma = 4{,}472 - 0{,}0559\tau^2$$

przy czym uzyskane wartości współczynników korelacji (r = 0,85) wskazują na niewystarczające dopasowanie tej krzywej do wyników doświadczalnych i w związku z tym nie należy stosować jej do opisu stanów granicznych w soli kamiennej.

Możliwości stosowania liniowych warunków wytrzymałościowych określa zależność:

$$\sqrt{J_2} = a + bI_1 \tag{5.10}$$

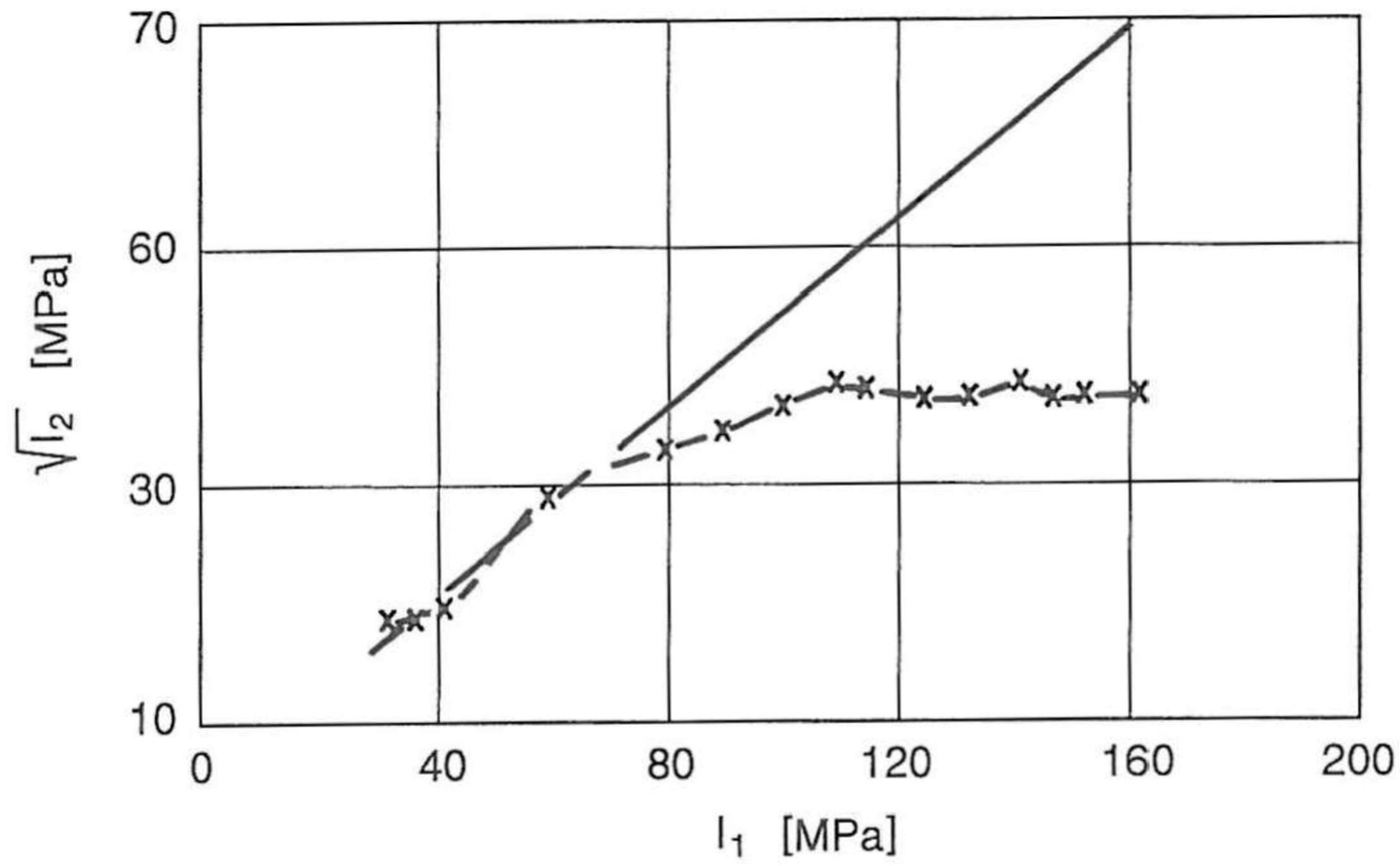
z której wynika, że dla badanych soli kryterium tym jest = 30 MPa (rys. 5.12). Wobec faktu lokalizacji zbiorników sprężonego powietrza na głębokościach, którym na ogół będzie towarzyszyć stan naprężenia o większych wartościach niezmienników, dla górotworu solnego należy sformułować nieliniowy warunek wytrzymałościowy.

Jak pokazano na wykresach, postulat ten jest spełniony przez nieliniowy warunek wytrzymałościowy Yina (rys. 5.13), który można przedstawić w postaci:

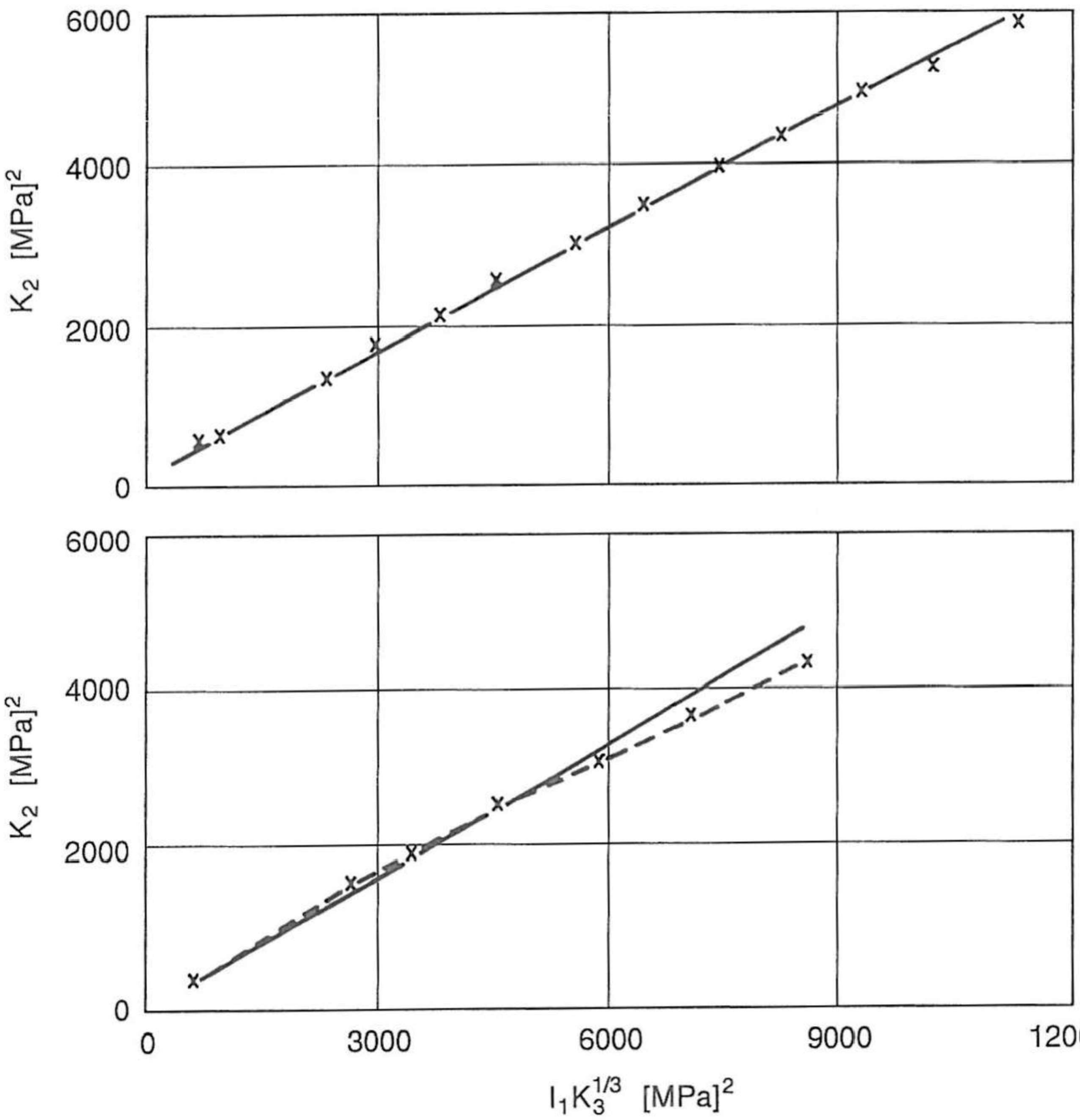
$$K_2 = A + BI_1\sqrt[3]{K_3} \tag{5.11}$$

gdzie:

A,B – stałe



Rys. 5.12. Kryterium doboru warunku równowagi granicznej dla soli kamiennej LGOM



Rys. 5.13. Interpretacja warunku wytrzymałościowego Yina dla soli kamiennej: a) LGOM, b) Mogilno

$$K_2 = \frac{1}{2}(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2)$$

$$K_3 = \frac{1}{2}(\sigma_1^3 + \sigma_2^3 + \sigma_3^3)$$

Wielkości K_2, K_3 są niezmiennikami stanu naprężenia i mogą być wyrażone przez klasyczne niezmienniki tensora i dewiatora naprężeń jako:

$$K_2 = J_2 \frac{I_1^2}{6}$$

$$K_3 = I_3 + I_1 J_2$$

Aproksymacja wyników badań obu rodzajów soli warunkiem (5.11) daje wysoką wartość współczynnika korelacji (r =0,98), a parametry równania wynoszą:

– dla soli LGOM

$A = 277{,}64\ (\mathrm{MPa})^2$

$B = 0{,}500$

– dla soli Mogilno

$A = 247{,}67\ (\mathrm{MPa})^2$

$B = 0{,}547$

W podsumowaniu przedstawionej analizy można stwierdzić, że do opisów stanów granicznych w górotworze solnym można stosować niektóre hipotezy wytrzymałościowe, powszechnie stosowane dla innych skał, ale w pewnym ograniczonym przedziale naprężeń. Przedział ten jest zdeterminowany wartością pierwiastka drugiego niezmiennika dewiatora stanu naprężenia, który dla obu testowanych prób soli wynosi około 30 MPa. W badaniach laboratoryjnych trójosiowego ściskania wartość ta odpowiada stanowi naprężenia, który towarzyszy zniszczeniu próbek przy ciśnieniach otaczających równych 5 MPa. Jak pokazano w poprzednich rozdziałach właśnie ta wartość zapoczątkowuje proces zmiany własności deformacyjnych soli kamiennej. Staje się ona ośrodkiem o rozwijających się cechach plastycznych. Z praktycznego punktu widzenia oznacza to, że w przedziale głębokości, w którym prowadzona jest działalność górnicza, a także projektuje się lokalizację podziemnych magazynów sprężonego powietrza, kruche zniszczenie górotworu solnego będzie pojawiać się sporadycznie przy niekorzystnej koncentracji naprężeń. Powstałemu stanowi wtórnej równowagi naprężeń będą na ogół towarzyszyć ciągłe deformacje soli kamiennej, ale o znacznych wartościach, a stan nośności granicznej można prognozować zaproponowaną hipotezą wytrzymałościową.

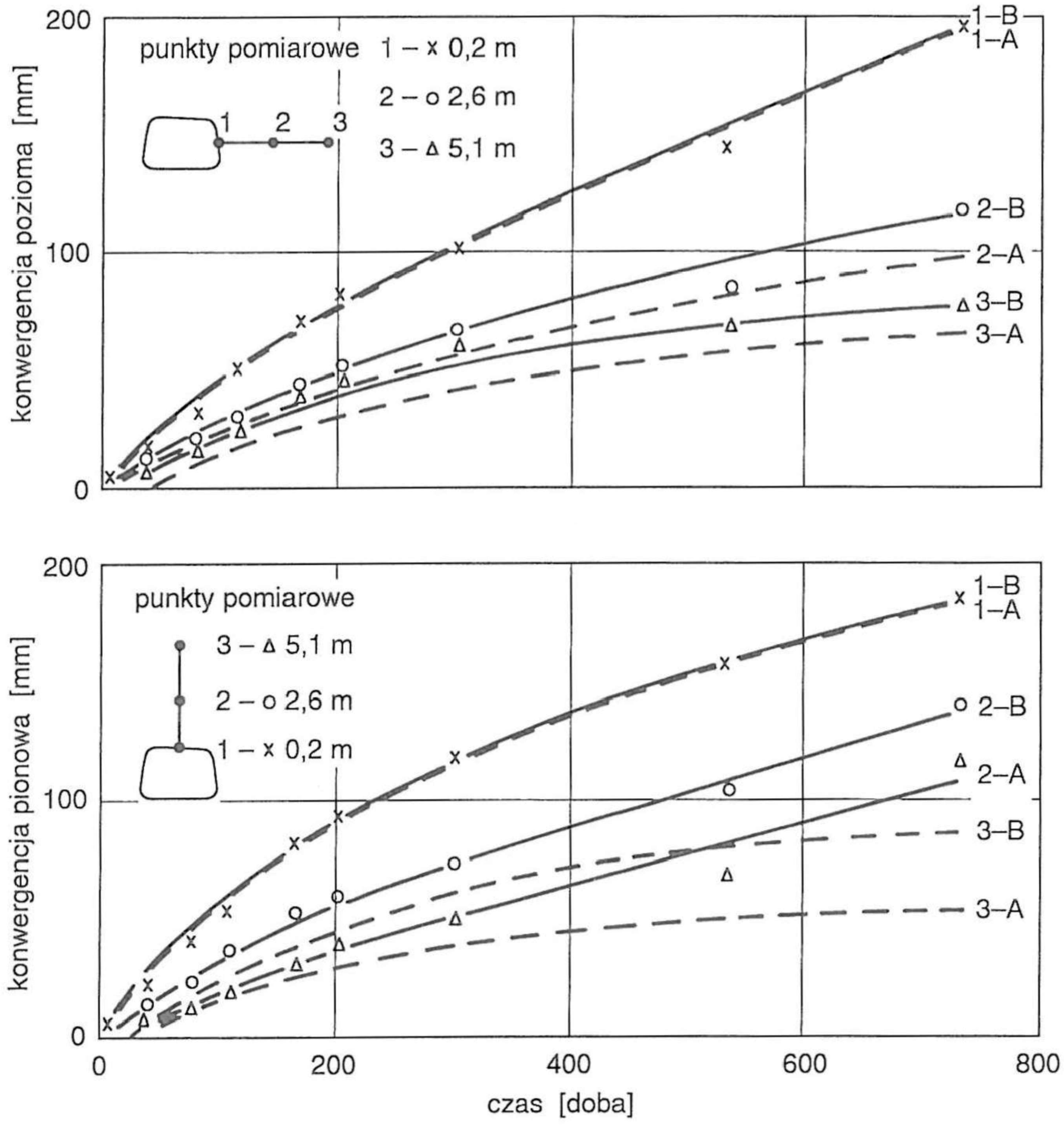
5.3. Weryfikacja modelu soli kamiennej w warunkach in situ

W praktyce górniczej powszechnie znany jest fakt, że wyniki obliczeń uzyskiwane z wykorzystaniem liczbowych parametrów górotworu, określanych na drodze badań laboratoryjnych, niejednokrotnie w znacznym stopniu odbiegają od wartości rejestrowanych w wyrobiskach. Przyczyny tego stanu można upatrywać w pozytywnej selekcji pobieranego materiału badawczego, niedoskonałości metodyk badawczych, czy wreszcie w uproszczonych z konieczności for-

mułach matematycznych. Stąd coraz częściej skłaniamy się do prowadzenia obserwacji bezpośrednio w górotworze, by wykorzystując stale doskonalone techniki komputerowe tworzyć teoretyczne modele i na nich prognozować zachowanie się wyrobisk.

Skonstruowane w wyniku badań i pomiarów związki liczbowe muszą być rozsądnym kompromisem między zróżnicowanymi własnościami rzeczywistego górotworu a ich matematyczną formą, stanowiącą możliwie wygodne narzędzie inżynierskie w pracach projektowych. Dlatego też każdy geomechaniczny model górotworu powinien zostać zweryfikowany pomiarami w warunkach naturalnych. Jest rzeczą oczywistą, że w przypadku badanego górotworu solnego, który ma służyć budowie podziemnych zbiorników sprężonego powietrza wykonywanych techniką ługowania otworami z powierzchni ziemi, nie ma praktycznych możliwości takiej weryfikacji.

Stąd też w celu zweryfikowania modelu górotworu solnego, konstruowanego dla potrzeb analizy stateczności magazynów sprężonego powietrza, wykorzystano wyniki specjalnie zaprojektowanych pomiarów na stanowisku badawczym zlokalizowanym w złożu soli LGOM, w obszarze górniczym Sieroszowice [23]. W stropie i ociosach wyrobiska chodnikowego, w punktach stabilizowanych na konturze przekopu oraz w otworach badawczych wewnątrz górotworu (rys. 5.14) mierzona była konwergencja w okresie blisko 2 lat. Wykorzystując wartości konwergencji



Rys. 5.14. Weryfikacja przyjętego modelu soli kamiennej w pomiarach na kopalni Sieroszowice (LGOM)

na konturze wyrobiska, przy zastosowaniu numerycznego modelowania górotworu, określono drogą analizy odwrotnej parametry deformacyjne górotworu solnego. Następnie parametry te wykorzystano do prognozowania zjawisk deformacyjnych wewnątrz górotworu dwiema metodami:

- tradycyjnie stosowaną w geomechanice do analizy stanów naprężenia i przemieszczenia górotworu, metodą elementów skończonych z liniową postacią równania konstytutywnego soli kamiennej (krzywe oznaczone symbolem A),
- metodą elementów skończonych z nieliniową charakterystyką deformacyjno-naprężeniową soli kamiennej, opisaną zgodnie z przebiegiem krzywej doświadczalnej, uzyskanej z badań laboratoryjnych, równaniem:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + k\left(\frac{\sigma}{E}\right)^n \tag{5.12}$$

gdzie E jest współczynnikiem odkształcalności podłużnej, wyznaczonym w przedziale prostoliniowej części charakterystyki; k i n są parametrami wyznaczonymi na drodze aproksymacji (krzywe oznaczone symbolem B), przy czym dla potrzeb obliczeń numerycznych parametry te można zastąpić procedurą wprowadzania parametrów deformacyjnych odcinkowo zmiennych.

Analiza wykresów pozwala stwierdzić, że przyjęcie prostoliniowej charakterystyki deformacyjnej soli kamiennej, pomimo określenia jej parametrów na drodze analizy odwrotnej, nie daje wyników zgodnych z rzeczywistymi. Natomiast charakterystyki otrzymane w warunkach laboratoryjnych opisują zjawiska deformacji w górotworze znacznie dokładniej, pod warunkiem poprawnego oszacowania wstępnych wartości współczynników odkształcalności.

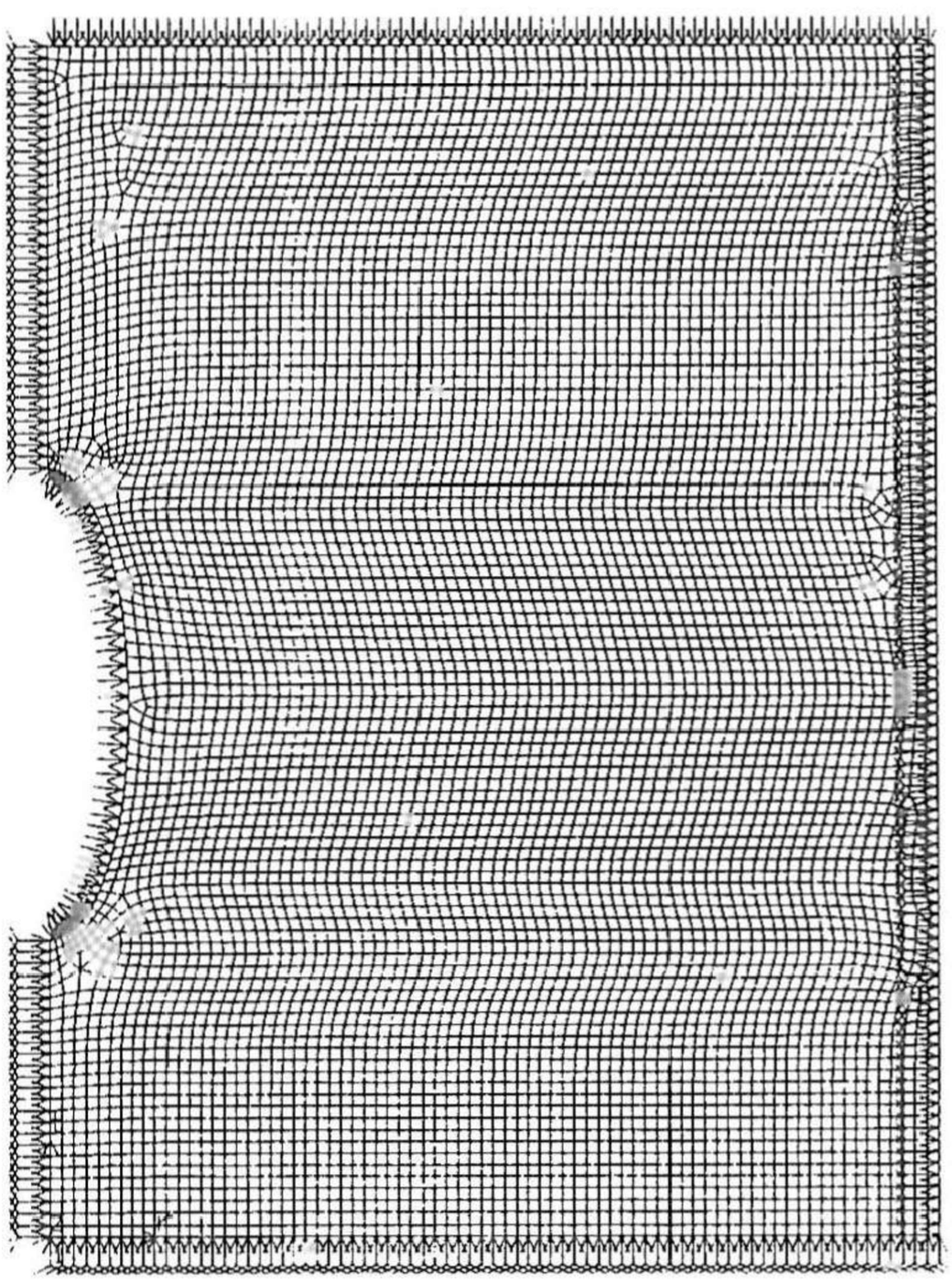
Zatem, w wyniku przeprowadzonych rozważań można zaproponować geomechaniczny model górotworu solnego łączący nieliniową postać równania konstytutywnego (5.12) z nieliniowym kryterium zniszczenia (5.11), w których parametry liczbowe mogą być określone na drodze rutynowych badań laboratoryjnych.

6. Stan wytężenia górotworu solnego w otoczeniu podziemnych zbiorników sprężonego powietrza

6.1. Wpływ kształtu zbiornika na wytężenie górotworu

Z teoretycznych rozważań mechaniki górotworu powszechnie znany jest fakt, że na wtórny stan naprężenia, jaki powstaje wokół wyrobiska górniczego, istotny wpływ ma jego kształt geometryczny. W odniesieniu do zbiorników sprężonego powietrza, projektowanych do współpracy ze szczytowo-akumulacyjną elektrownią gazową, zagadnienie to sprowadza się do poszukiwania takiej geometrii podziemnej komory, która, przy istniejących założeniach projektowych, dotyczących pojemności magazynowania, głębokości posadowienia, ciśnienia magazynowanego powietrza, parametrów geomechanicznych górotworu, zapewni optymalną pracę komory w taki sposób, aby spełnione były równocześnie dwa warunki: bezpieczeństwa i ekonomii. Na niektóre z tych założeń projektowych, na przykład na własności górotworu lub głębokość posadowienia zbiornika w pokładowym złożu soli, nie mamy wpływu. Na pozostałe, wynikające z parametrów technicznych pracy turbiny gazowej, tj. na niezbędne objętości zbiorników powietrza i przedział ciśnień roboczych oraz na głębokość lokalizacji w wysadzie solnym, nasz wpływ jest ograniczony.

Problem długotrwałej stateczności podziemnych zbiorników sprężonego powietrza sprowadza się zatem do określenia stanu wytężenia górotworu solnego dla ustalonych parametrów magazynowania powietrza i różnych, z góry przyjętych kształtów zbiorników oraz wybranych głębokości posadowienia stropu. Analiza otrzymanych wyników, w aspekcie przyjętego kryterium wytrzymałościowego, stanowi podstawę wyboru takiej geometrii kawerny, która we wskazanych warunkach zapewni jej bezawaryjną pracę.



Rys. 6.1. Model geometryczny górotworu ze zbiornikiem sprężonego powietrza w osiowo-symetrycznym stanie naprężenia

W celu praktycznej analizy tak sformułowanego problemu, zrealizowane zostały badania stateczności podziemnych zbiorników na modelach numerycznych, spełniających następujące założenia:

- w zakresie parametrów geometrycznych (rys. 6.1):
  - zgodnie z rozważaniami przedstawionymi w rozdziale 3., przyjęto pojemność użyteczną pojedynczego zbiornika równą 230 000 m^3;
  - wykorzystując dotychczasowe doświadczenia w projektowaniu pustek ługowanych w złożach soli, do analizy przyjęto przestrzenne modele

zbiorników w kształcie elipsoidy obrotowej o różnych długościach osi, co określono smukłością:

h:d

gdzie h jest wysokością zbiornika, d – osią poziomą. Przy ustalonej objętości, otrzymano zbiorniki o wymiarach:

h:d = 1 h = d = 76 m,
h:d = 2 h = 120 m i d = 60 m
h:d = 3 h = 160 m i d = 53 m
h:d = 4 h = 192 m i d = 48 m

- zewnętrzne wymiary osiowo-symetrycznych modeli górotworu ustalano zależnie od wymiarów zbiorników tak, by zgodnie z techniką modelowania numerycznego, brzegom zewnętrznym nadać cechy górotworu pierwotnego;
- w wyniku analizy możliwości lokalizacji zbiorników w złożach soli kamiennej, dla każdego modelu przyjęto głębokość posadowienia stropu w trzech wariantach:
- 600 m, 800 m, 1000 m;

– w zakresie obciążeń:
  - zgodnie z przyjętymi parametrami technicznymi turbiny gazowej, ustalono zakres modelowanych ciśnień wewnątrz zbiornika:

    w cyklu pracy szczytowej p_{max} = 10,5 MPa,
    p_{min} = 7,0 MPa,
    w cyklu interwencyjnym p_{max} = 10,5 MPa,
    p_{gr} = 4,2 MPa;

  - górny brzeg modelu obciążony został równomiernym obciążeniem ekwiwalentnym usuniętemu nadkładowi;
  - na zewnętrznych brzegach pionowych i dolnym ustalono warunki przemieszczeniowe, nadając im jeden stopień swobody;

– w zakresie własności geomechanicznych:
  - zgodnie z ustalonym równaniem konstytutywnym górotworu solnego, przyjęto nieliniowy związek między naprężeniami i odkształceniami, który na użytek wykorzystywanego programu MES zastąpiono zależnością liniową, odcinkowo zmienną (rys. 6.2)
  - zgodnie z wynikami rozważań na temat granicznego warunku równowagi, przyjęto następujące kryterium wytrzymałościowe:

    – gdy

$$\sqrt{J_2} = 4{,}338 + 0{,}399 I_1$$

powierzchnia graniczna opisana jest równaniem

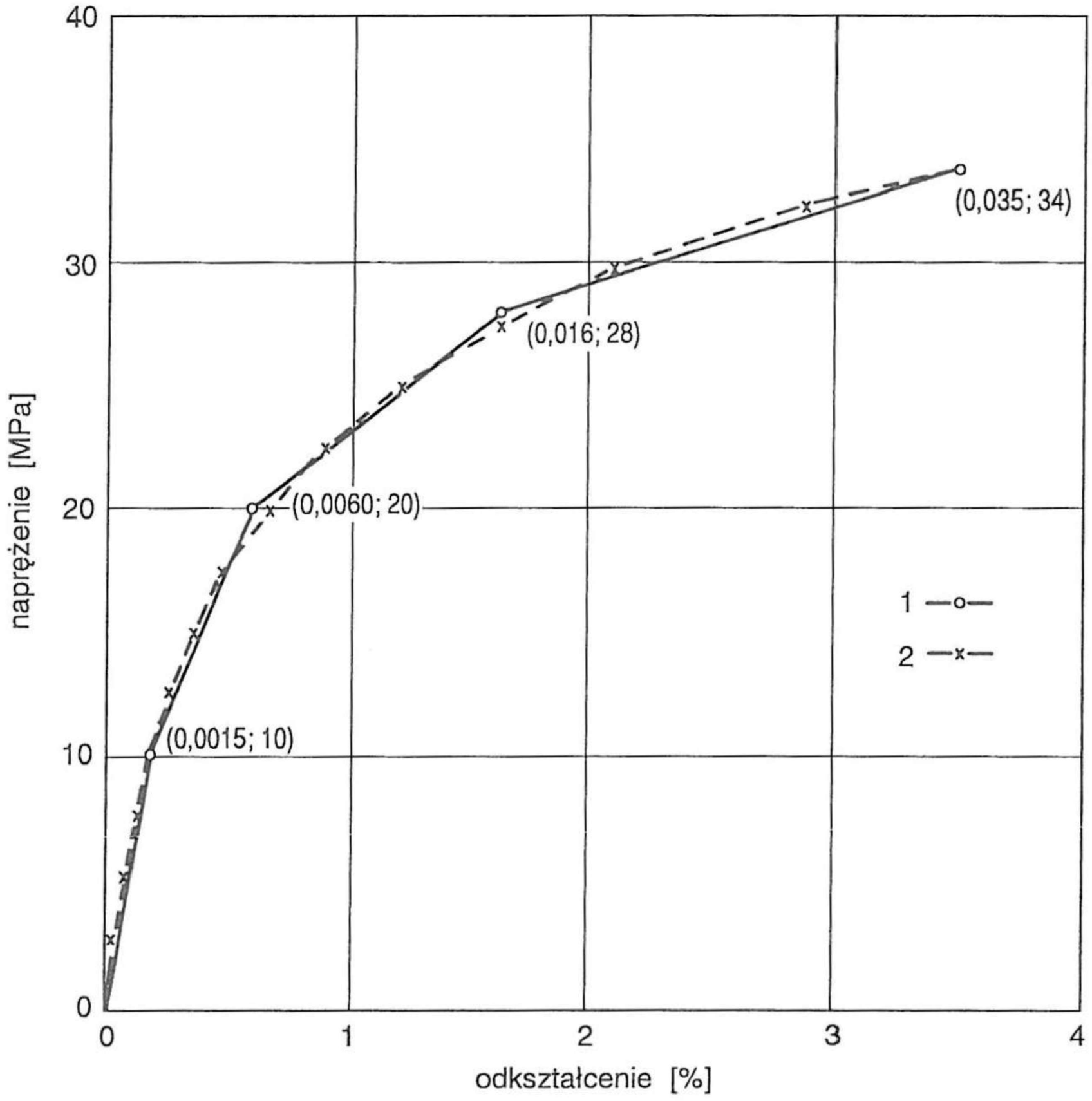
$$\tau = 8{,}622\sigma^{0{,}368} + 0{,}75$$

– gdy

$$\sqrt{J_2} \neq 4{,}338 + 0{,}399 I_1$$

powierzchnia graniczna opisana jest równaniem

$$K_2 = 277{,}642 + 0{,}5 I_2 \sqrt[3]{K_3}$$



Rys. 6.2. Interpretacja geometryczna rzeczywistego (2) i uproszczonego (1) równania konstytutywnego soli kamiennej

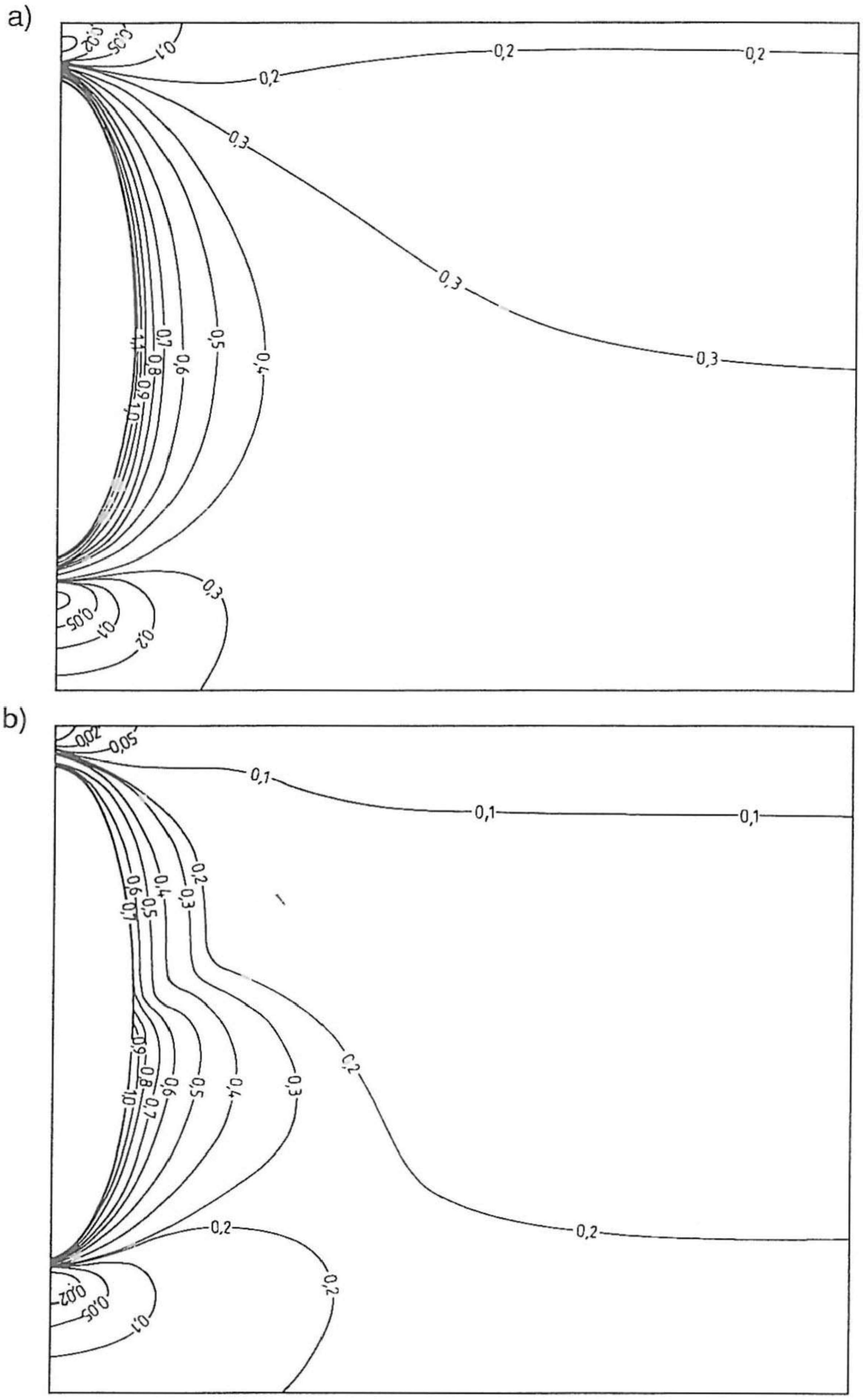
Dla każdego z określonych w powyższy sposób 36 modeli zbiorników ze sprężonym powietrzem, obliczono składowe tensora naprężeń we wszystkich węzłach analizowanego obszaru górotworu. Wartości te posłużyły do obliczeń stanu wytężenia górotworu, zgodnie ze zdefiniowanymi warunkami wytrzymałościowymi. W celu umożliwienia praktycznej oceny stanu górotworu w całym modelu, niezaleznie od tego, które kryterium wytrzymałościowe jest w rozpatrywanym punkcie spełnione, warunki wytrzymałościowe sprowadzono do postaci bezwymiarowej, definiując w ten sposób stopień wytężenia górotworu wzorami:

$$W = \frac{\tau}{8{,}622\rho^{0{,}368} + 0{,}75} \tag{6.1}$$

lub

$$W = \frac{K_2}{277{,}642 + 0{,}5 I_2 \sqrt[3]{K_3}} \tag{6.2}$$

Ich graficzną interpretacją mogą być mapy izolinii stopnia wytężenia w analizowanych obszarach, służące wstępnej ocenie stanu górotworu. Przykładem takiego zastosowania jest mapa dla zbiornika posadowionego na głębokości 600 m, przy skrajnych wartościach ciśnień sprężonego powietrza w interwencyjnym cyklu pracy turbiny (rys.6.3). Wartość wskaźnika W<1 ozna-



Rys. 6.3. Mapa izolinii stopnia wytężenia górotworu wokół zbiornika w kształcie elipsoidy obrotowej o stosunku osi h:d=3 przy ciśnieniu granicznym (a) i maksymalnym ciśnieniu roboczym (b); strop zbiornika na głębokości 600 m

cza, że górotwór w danym punkcie jest stateczny. Wartość W = 1 określa osiągnięcie stanu granicznego i zapoczątkowanie zniszczenia skały.

Analiza zmian wartości tego wskaźnika w stropie i spągu oraz w ociosach w połowie ich wysokości wskazuje na ścisłą zależność stanu wytężenia od kształtu komory (rys. 6.4. – rys. 6.7). Spostrzeżenie to potwierdza również rozkład stopnia wytężenia wzdłuż konturów zbiorników (rys. 6.8 – rys. 6.11). Dla warunków geomechanicznych panujących w górotworze solnym na głębokości 600 m, największe wytężenie, o największym zasięgu wgłąb górotworu towarzyszy ociosom niskich i szerokich zbiorników. Natomiast zbiornik o smukłości h:d = 4 jest zagrożony utratą stateczności ze względu na osiągnięcie w spągu stanu nośności granicznej przy najmniejszej wartości ciśnienia sprężonego powietrza podczas interwencyjnej pracy zbiornika.

Zbiorniki o smukłości h:d = 2 i h:d = 3 są stateczne, a stopień wytężenia na ich konturach ma praktycznie tą samą wartość. Jedynie w stropie i spągu wyższego zbiornika zaobserwować można nieznaczną koncentrację wytężenia, zwłaszcza przy granicznym ciśnieniu wewnętrznym.

Przedstawiona analiza dowodzi, że przy lokalizacji stropu zbiornika na głębokości 600 m i wybranej turbinie gazowej, zbiornik zachowa stateczność, jeśli jego wysokość będzie równa od dwu- do trzykrotnej długości średnicy. Konieczność zastosowania innego kształtu zbiornika oznacza potrzebę zweryfikowania parametrów technicznych pracy turbiny w aspekcie zmiany ciśnień roboczych.

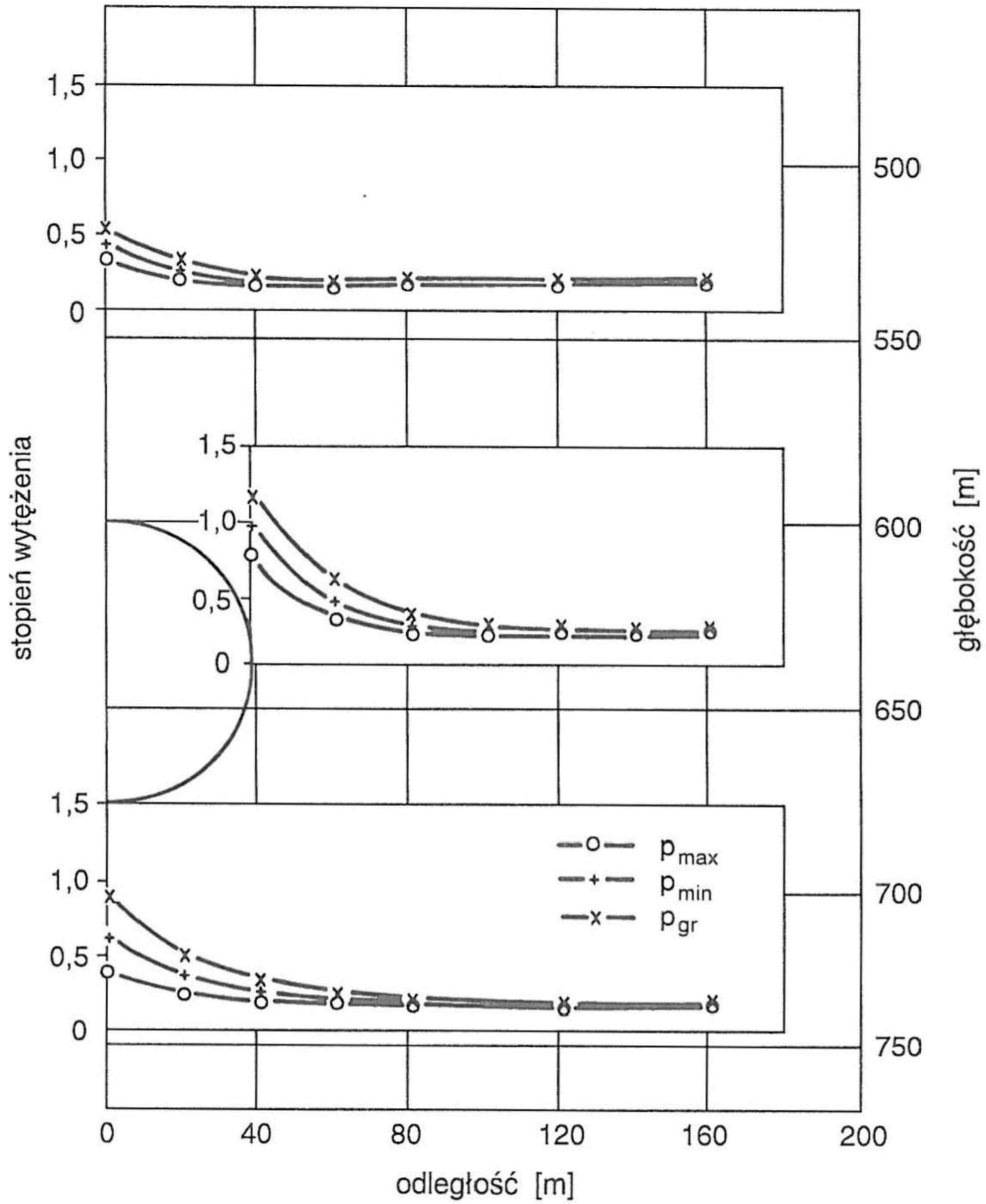
6.2. Głębokość posadowienia zbiorników w złożu soli

Głębokość, na jakiej mogą być zlokalizowane zbiorniki sprężonego powietrza jest przede wszystkim zdeterminowana warunkami geologicznymi towarzyszącymi złożom soli kamiennej. Pewna dowolność w wyborze głębokości posadowienia istnieje jedynie w przypadku złóż wysadowych, jakkolwiek wybór ten jest uwarunkowany technologią komór ługowniczych i technologią ich eksploatacji jako podziemnych magazynów sprężonego powietrza. Istotną rolę odgrywa tu wielkość ciśnienia szczelinowania górotworu. Nie można także zaniedbać względów natury ekonomicznej. W praktyce górnictwa solnego oznacza to, że należy brać pod uwagę możliwość posadowienia stropu zbiorników ze sprężonym powietrzem w przedziale głębokości do 1000 m.

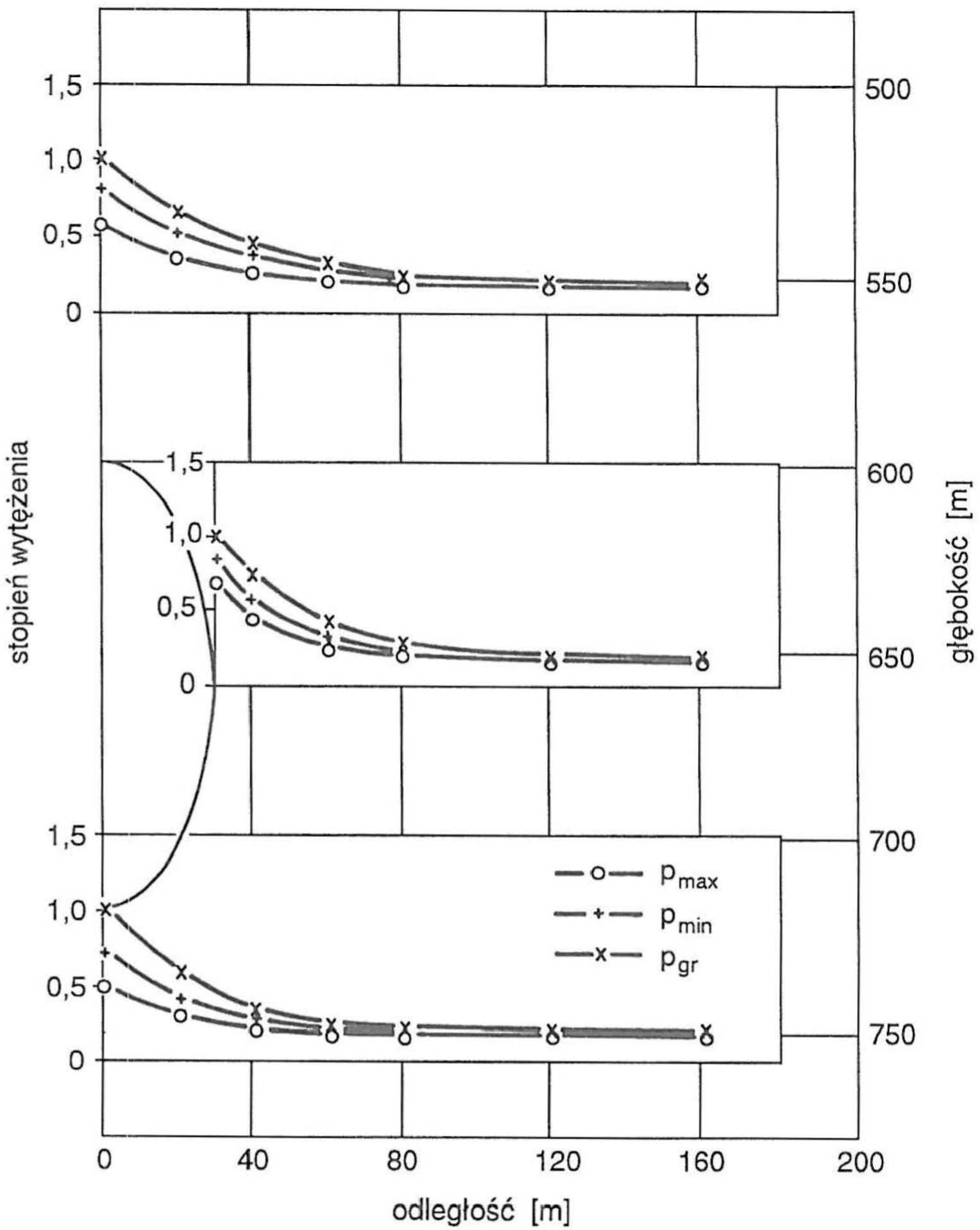
Problem związku stanu wytężenia górotworu solnego w otoczeniu magazynów sprężonego powietrza z głębokością ich posadowienia jest zagadnieniem złożonym. Z jednej strony, w miarę wzrostu głębokości zmieniają się własności fizyko-mechaniczne soli kamiennej, co jest skutkiem procesów tektonicznych. Z drugiej strony, w wyniku działania sił masowych, wraz z głębokością wzrasta wartość pierwotnych ciśnień górotworu, co bezpośrednio rzutuje na stan soli kamiennej i charakter jej zniszczenia, co omówiono w poprzednim rozdziale.

Dla praktycznej oceny wpływu tych czynników na stateczność zbiorników, zamodelowano ich lokalizację na głębokości 800 i 1000 m (rys. 6.12 – rys. 6.15), deklarując odpowiednie warunki brzegowe na zewnętrznych brzegach modeli numerycznych.

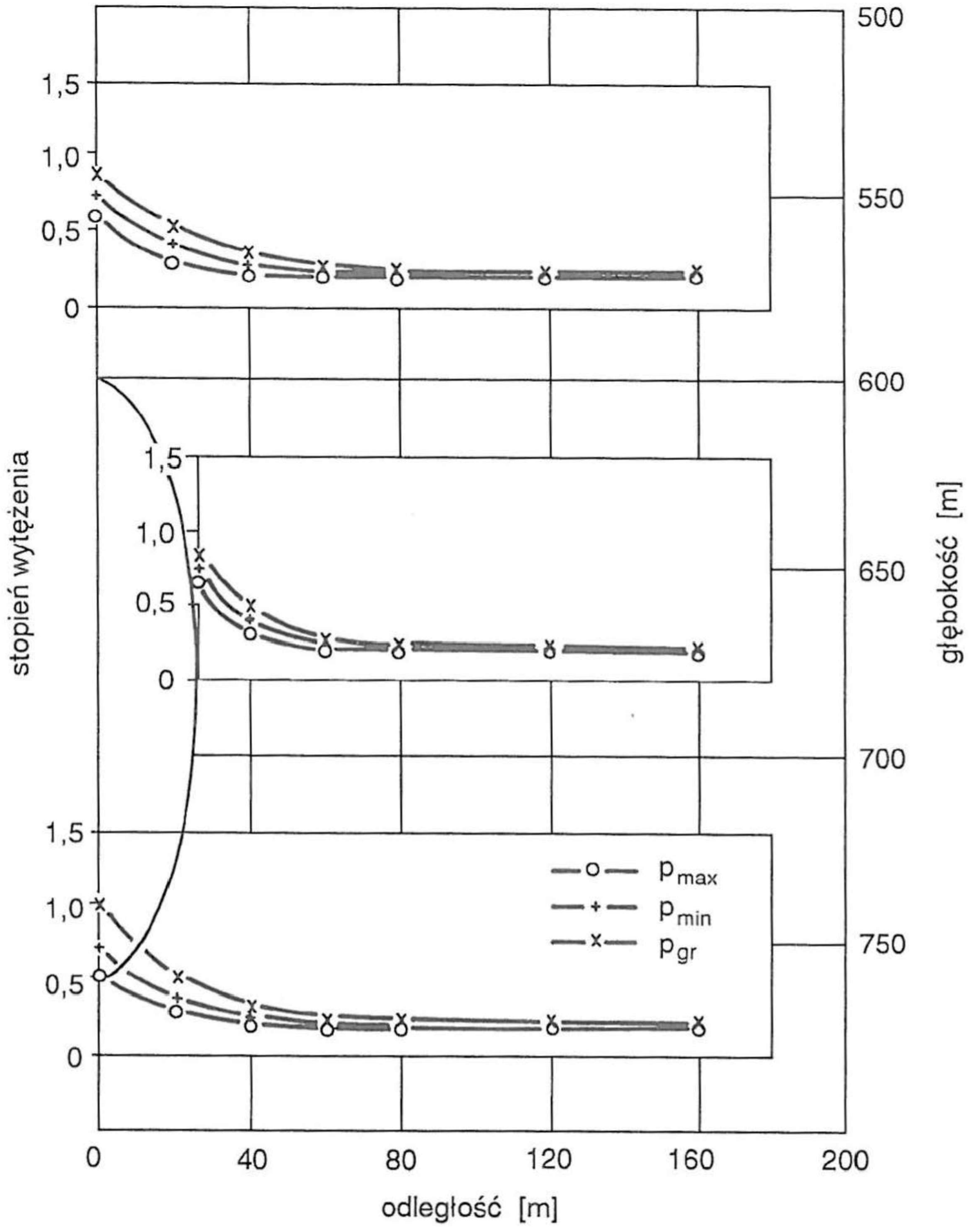
Z przedstawionych rozkładów wytężenia górotworu na konturze zbiorników o smukłościach h:d = 2 i h:d =3 wynika, że, przy pełnym zakresie ciśnień magazynowanego powietrza, możliwa jest jedynie lokalizacja niższego zbiornika na głębokości 800 m (rys. 6.12). Zbiornik wyższy, po-



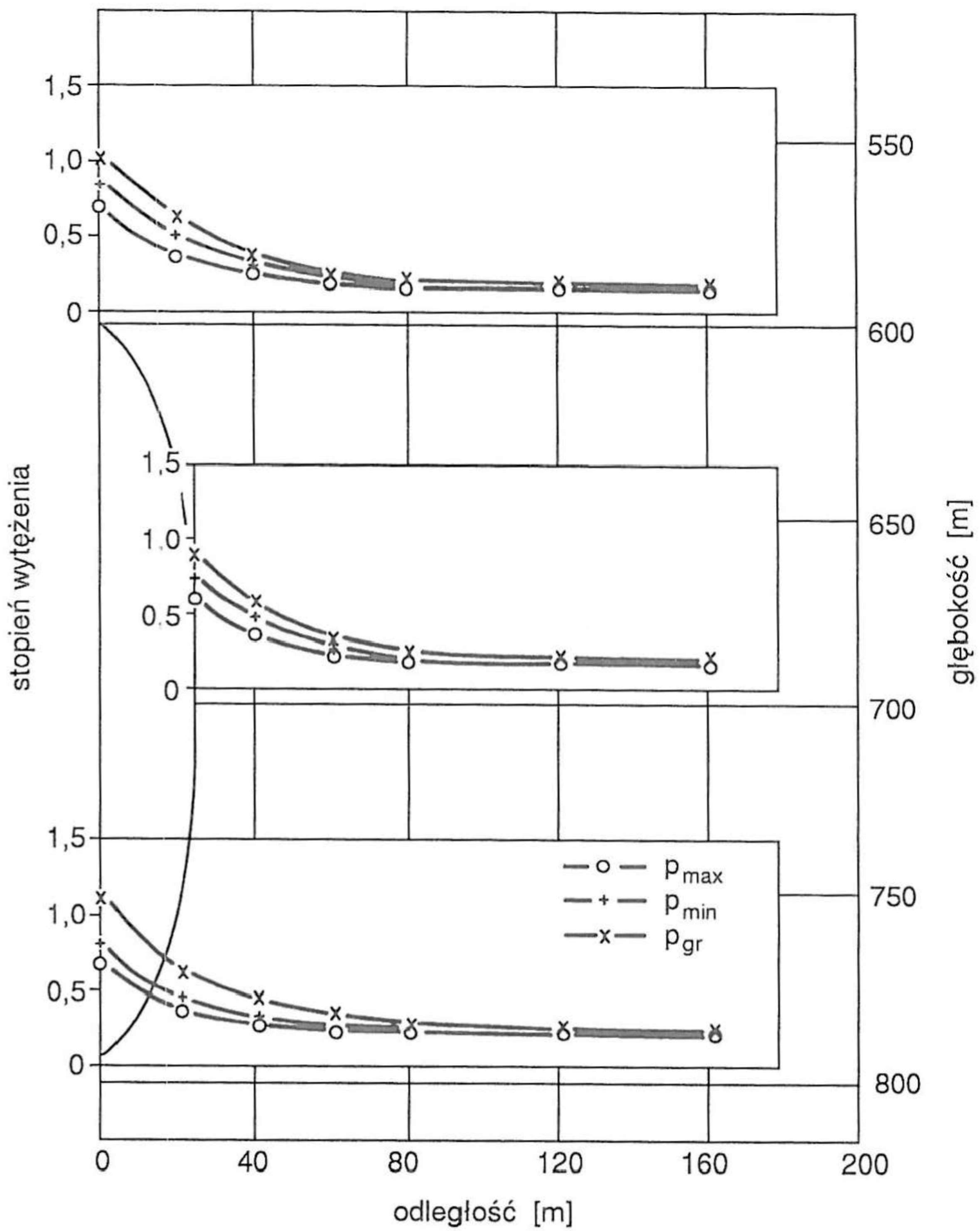
Rys. 6.4. Stopień wytężenia górotworu na poziomie stropu, ociosów i spągu zbiornika w kształcie kuli przy różnych ciśnieniach sprężonego powietrza; strop zbiornika na głębokości 600 m



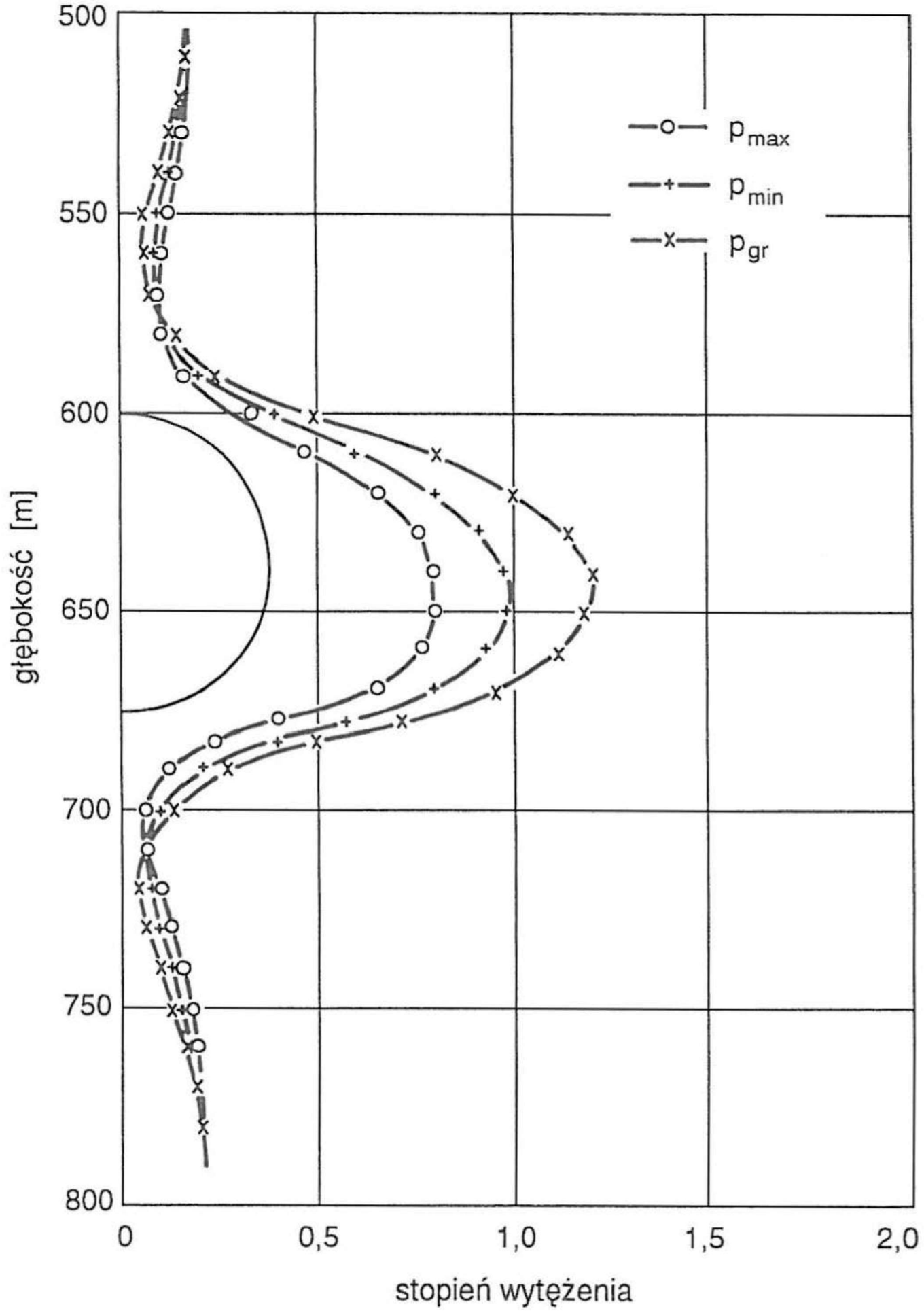
Rys. 6.5. Stopień wytężenia górotworu na poziomie stropu, ociosów i spągu zbiornika w kształcie elipsoidy obrotowej o stosunku osi h:d=2 przy różnych ciśnieniach sprężonego powietrza; strop zbiornika na głębokości 600 m



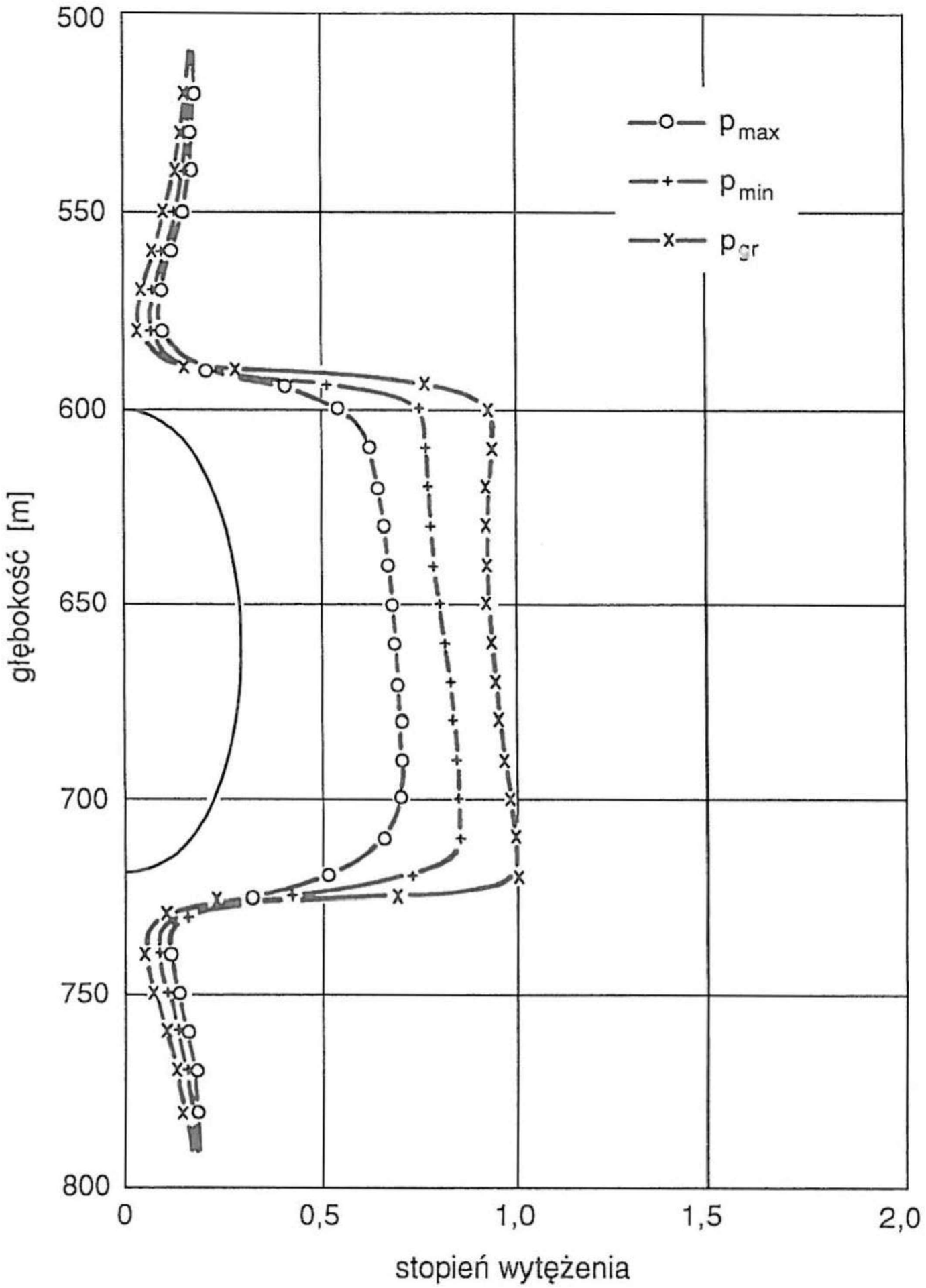
Rys. 6.6. Stopień wytężenia górotworu na poziomie stropu, ociosów i spągu zbiornika w kształcie elipsoidy obrotowej o stosunku osi h:d=3 przy różnych ciśnieniach sprężonego powietrza; strop zbiornika na głębokości 600 m



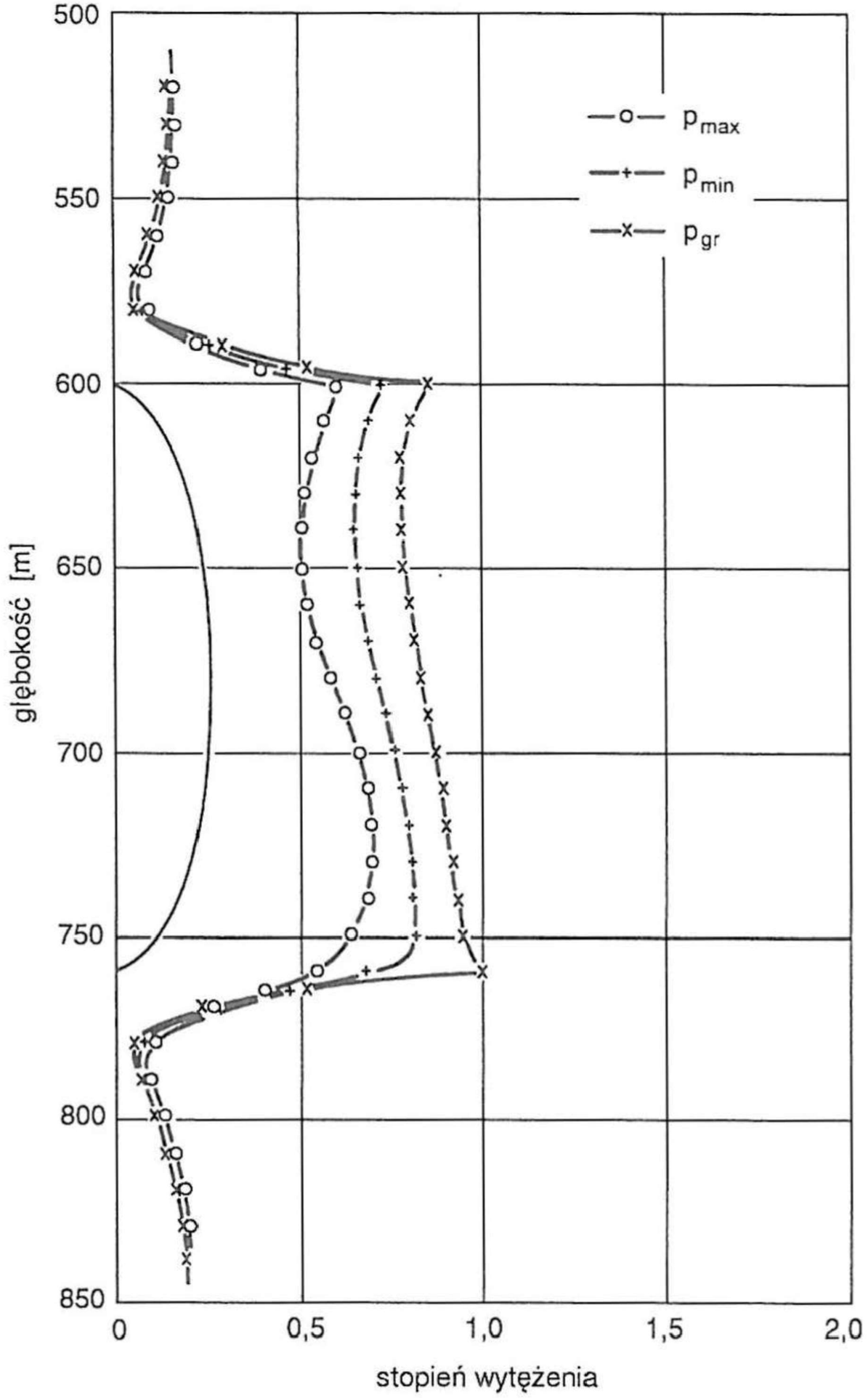
Rys. 6.7. Stopień wytężenia górotworu na poziomie stropu, ociosów i spągu zbiornika w kształcie elipsoidy obrotowej o stosunku osi h:d=4 przy różnych ciśnieniach sprężonego powietrza; strop zbiornika na głębokości 600 m



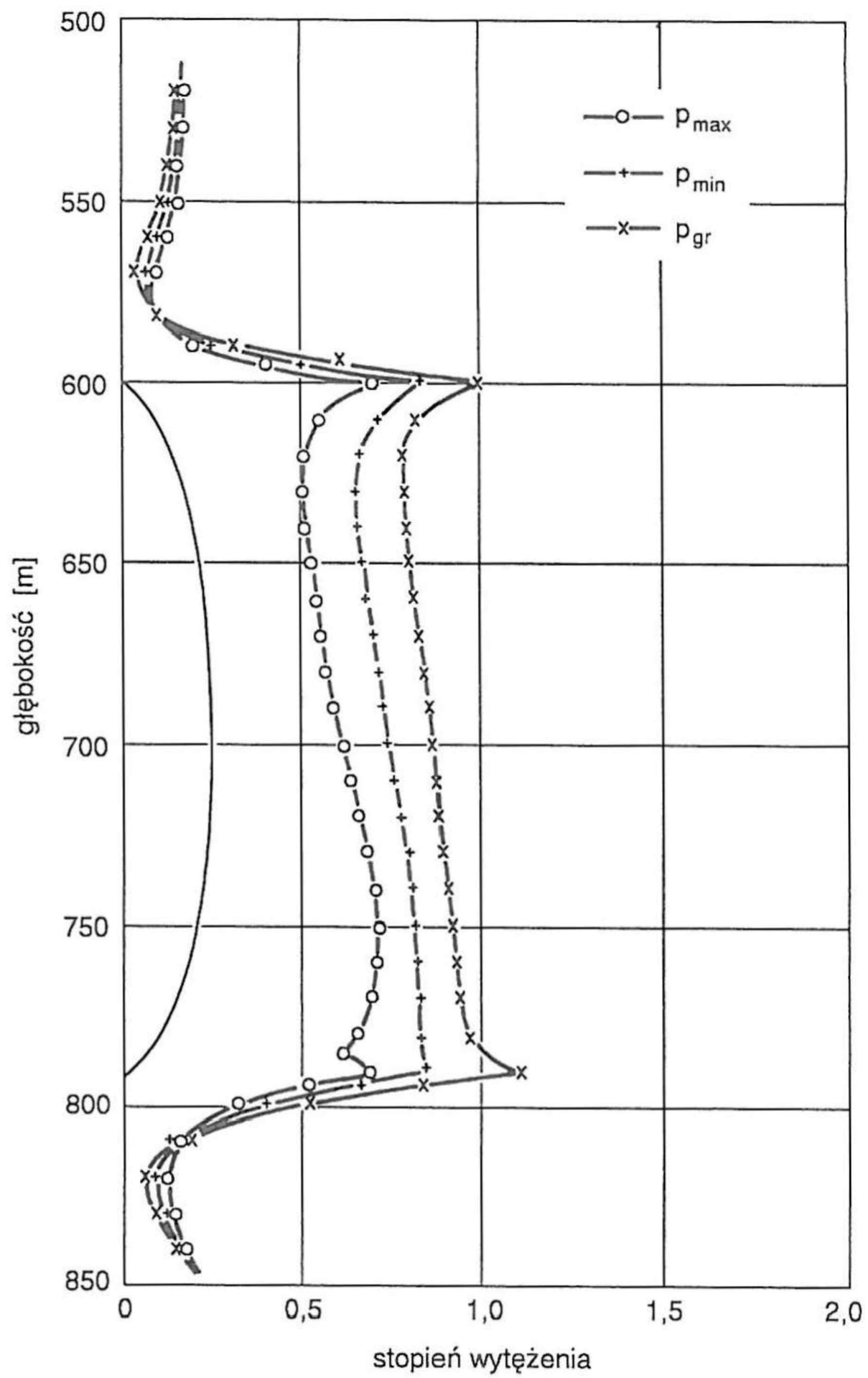
Rys. 6.8. Rozkład wytężenia górotworu na konturze zbiornika w kształcie kuli przy różnych ciśnieniach sprężonego powietrza; strop zbiornika na głębokości 600 m



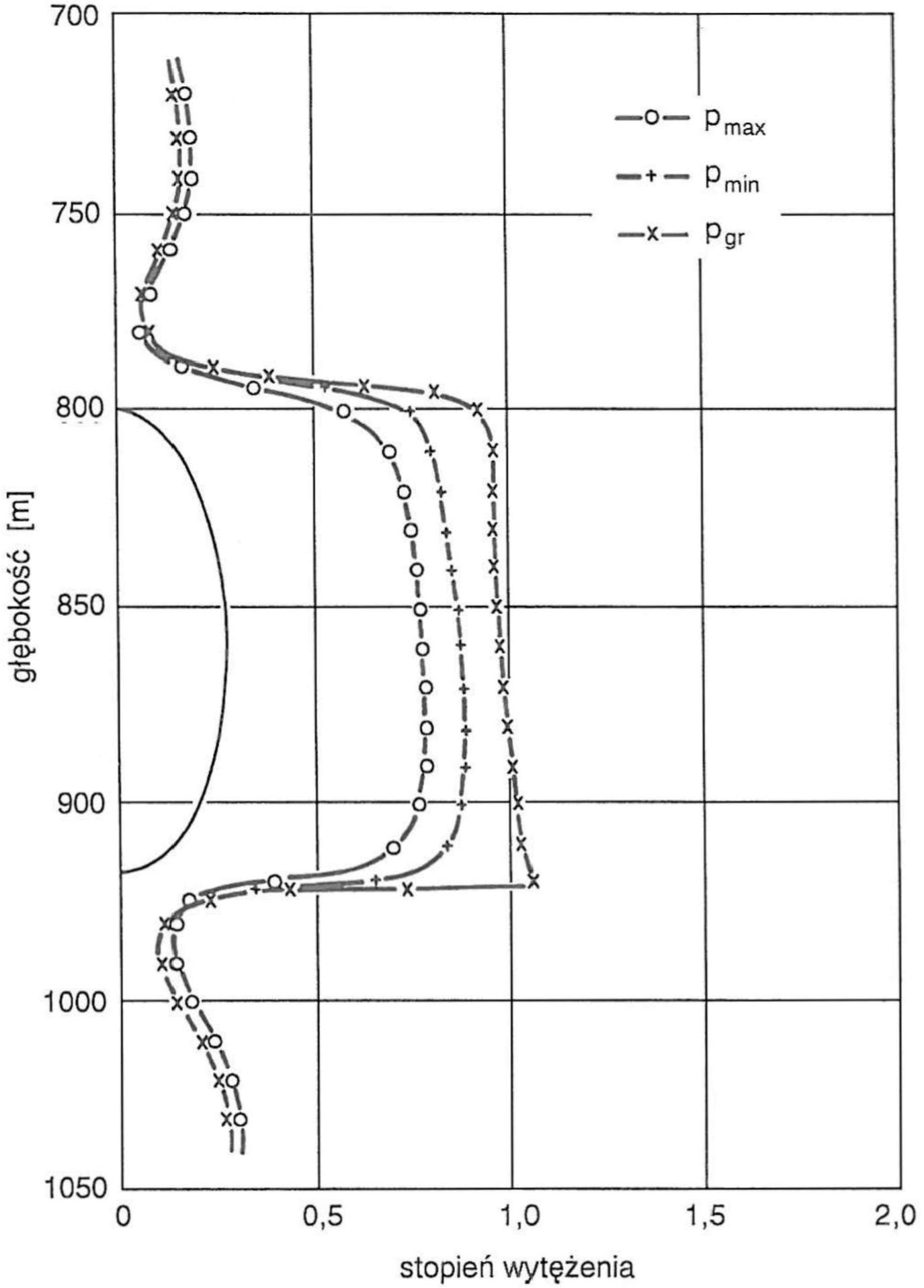
Rys. 6.9. Rozkład wytężenia górotworu na konturze zbiornika w kształcie elipsoidy obrotowej o stosunku osi h:d=2 przy różnych ciśnieniach sprężonego powietrza; strop zbiornika na głębokości 600 m



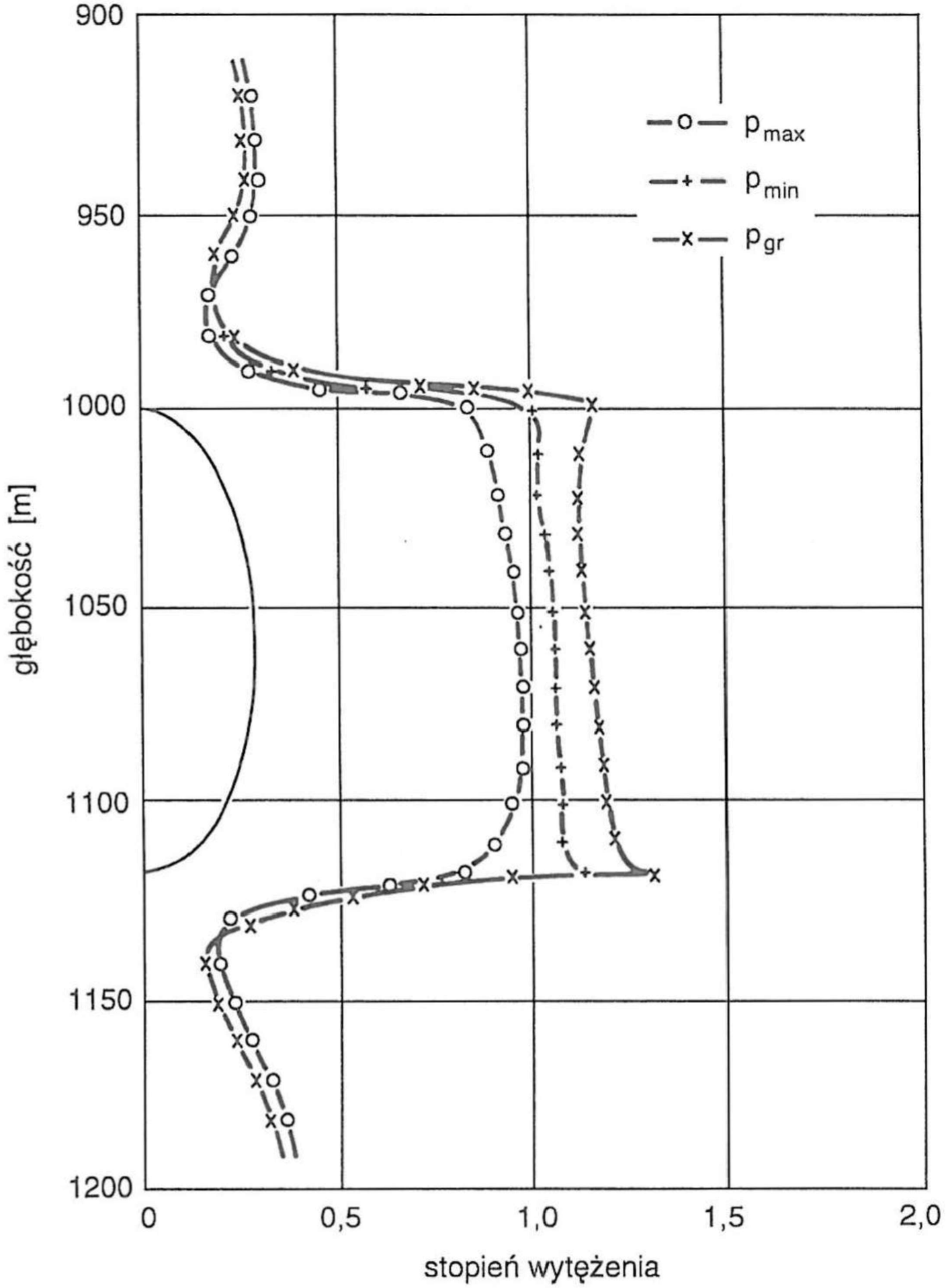
Rys. 6.10. Rozkład wytężenia górotworu na konturze zbiornika w kształcie elipsoidy obrotowej o stosunku osi h:d=3 przy różnych ciśnieniach sprężonego powietrza; strop zbiornika na głębokości 600 m



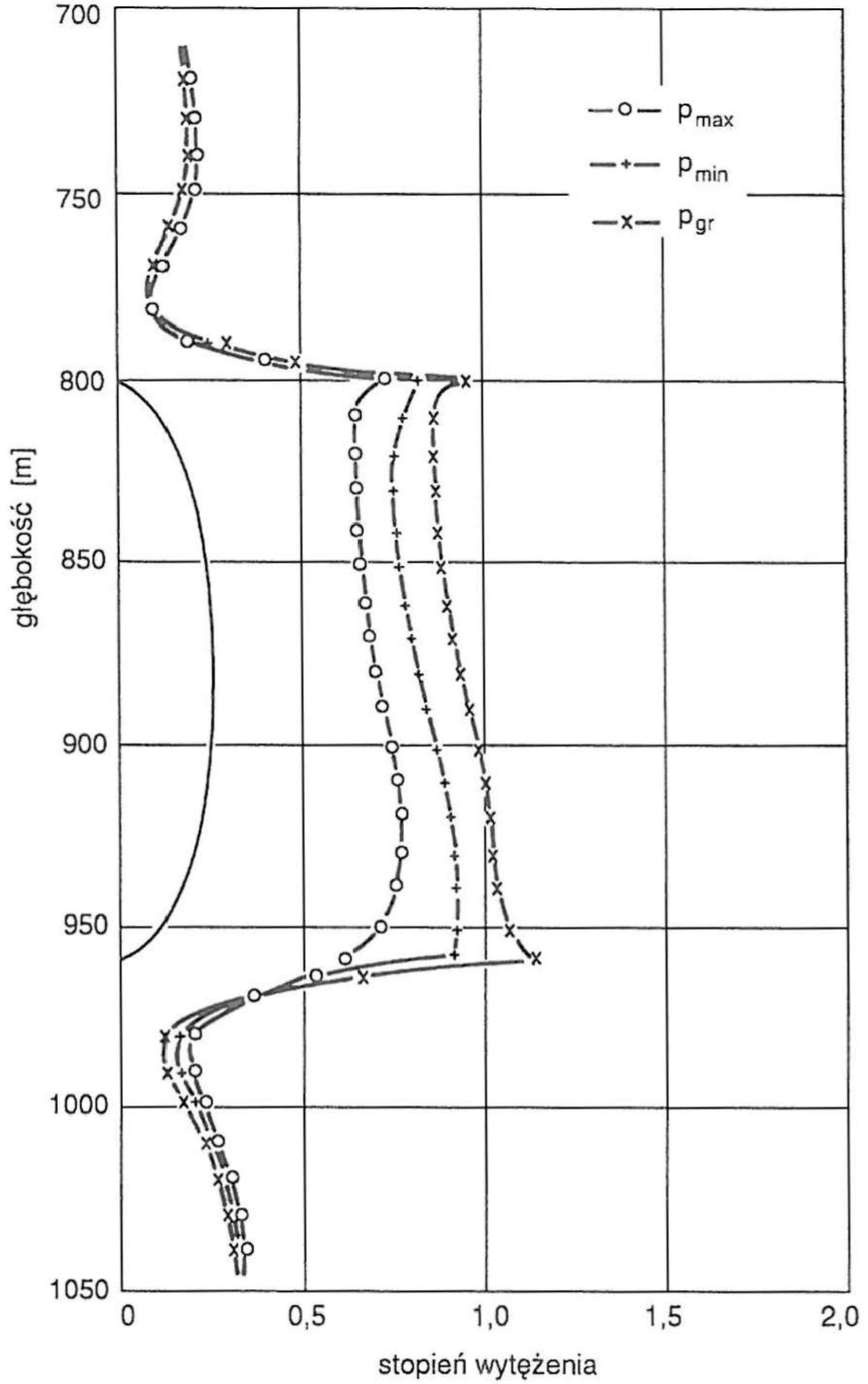
Rys. 6.11. Rozkład wytężenia górotworu na konturze zbiornika w kształcie elipsoidy obrotowej o stosunku osi h:d=4 przy różnych ciśnieniach sprężonego powietrza; strop zbiornika na głębokości 600 m



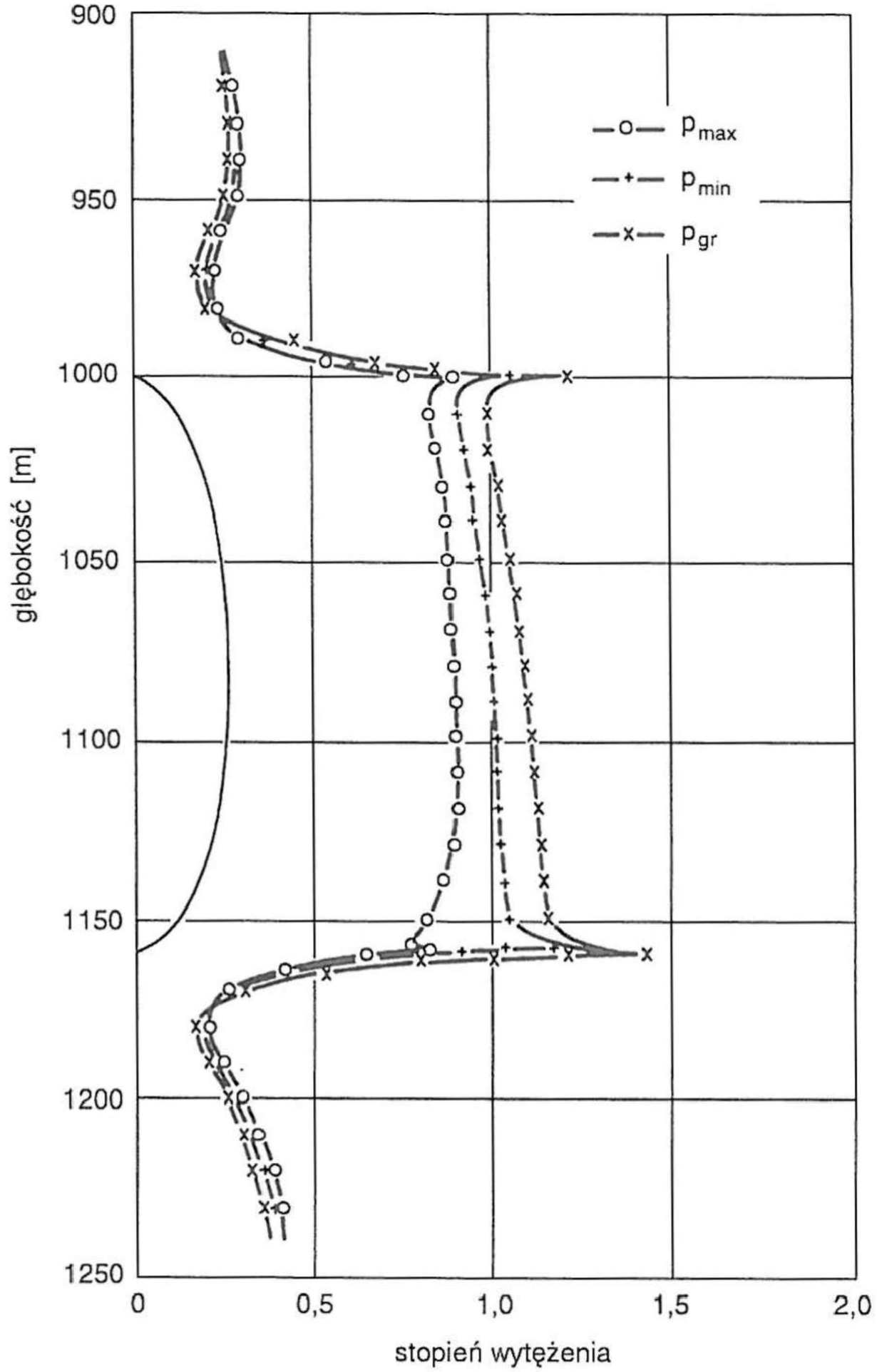
Rys. 6.12. Rozkład wytężenia górotworu na konturze zbiornika w kształcie elipsoidy obrotowej o stosunku osi h:d=2 przy różnych ciśnieniach sprężonego powietrza; strop zbiornika na głębokości 800 m



Rys. 6.13. Rozkład wytężenia górotworu na konturze zbiornika w kształcie elipsoidy obrotowej o stosunku osi h:d=2 przy różnych ciśnieniach sprężonego powietrza; strop zbiornika na głębokości 1000 m

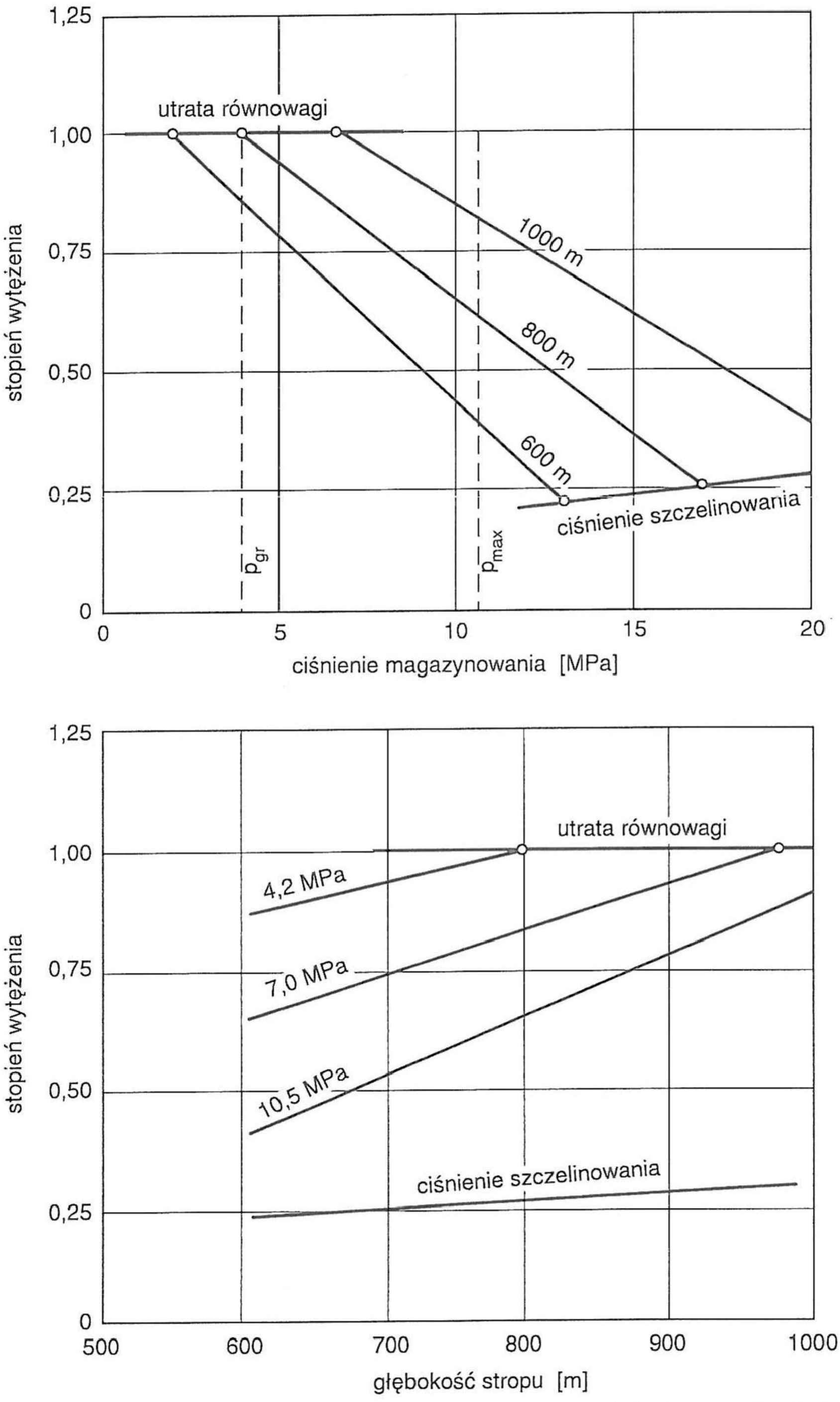


Rys. 6.14. Rozkład wytężenia górotworu na konturze zbiornika w kształcie elipsoidy obrotowej o stosunku osi h:d=3 przy różnych ciśnieniach sprężonego powietrza; strop zbiornika na głębokości 800 m



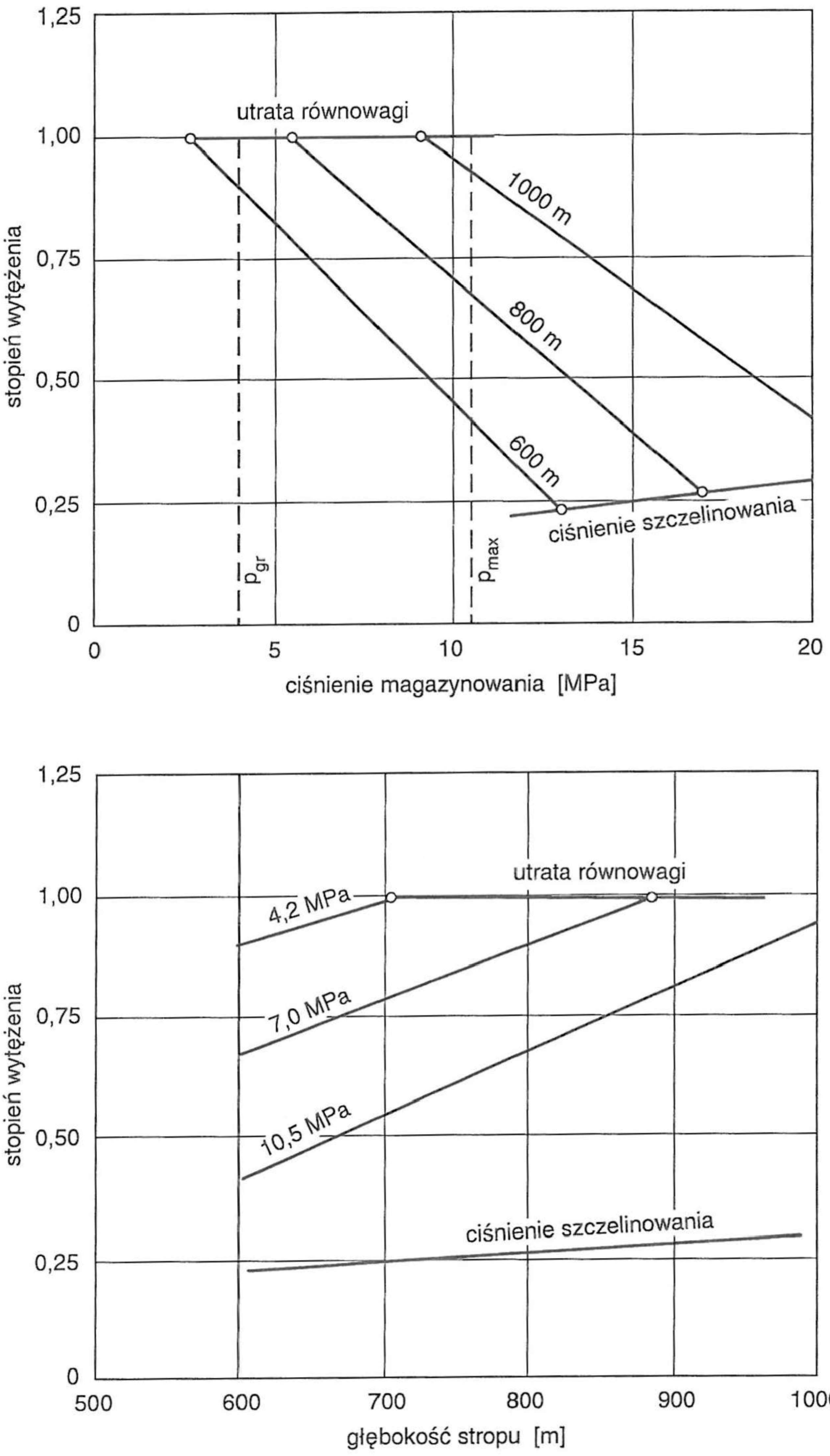
Rys. 6.15. Rozkład wytężenia górotworu na konturze zbiornika w kształcie elipsoidy obrotowej o stosunku osi h:d=3 przy różnych ciśnieniach sprężonego powietrza; strop zbiornika na głębokości 1000 m

sadowiony na tej głębokości nie zachowa stateczności podczas pracy awaryjnej (rys. 6. 14). Pozostałe warianty nie spełniają warunku stateczności także dla ciśnień minimalnych przy normalnej pracy elektrowni.



Rys. 6.16. Wpływ ciśnienia sprężonego powietrza i głębokości posadowienia zbiornika w kształcie elipsoidy obrotowej o stosunku osi h:d=2 na wytężenie górotworu

Zatem wyniki przedstawionej analizy potwierdzają poprzednie spostrzeżenie: parametry techniczne turbiny gazowej w istotny sposób ograniczają możliwości projektowe zbiorników sprę-



Rys. 6.17. Wpływ ciśnienia sprężonego powietrza i głębokości posadowienia zbiornika w kształcie elipsoidy obrotowej o stosunku osi h:d=3 na wytężenie górotworu

żonego powietrza. Przy określonym na wstępie przedziale ciśnień wewnętrznych, zbiorniki należy lokalizować możliwie płytko.

Interpolacja wyników obliczeń numerycznych pozwala stwierdzić, że z wytypowaną turbiną gazową może współpracować zbiornik powietrza o smukłości 2, którego strop posadowiono na maksymalnej głębokości 800 m (rys. 6.16), lub zbiornik o smukłości 3, którego głębokość nie przekracza 700 m (rys. 6.17). Wobec braku takiej możliwości, należy zweryfikować parametry turbiny.

6.3. Wpływ ciśnienia magazynowanego powietrza na wytężenie górotworu

Z przeprowadzonych badań modelowych wynika jednoznacznie, że wytężenie górotworu, mierzone wartością wskaźnika W wzrasta wraz z głębokością, a równomierność rozkładu wytężenia na konturach zbiorników i ich stateczność uzależniona jest od wartości ciśnienia wewnętrznego. Należy przy tym zauważyć, że ciśnienie sprężonego powietrza jest niezmiernie ważnym czynnikiem, wpływającym na stateczność górotworu i bezawaryjną pracę zbiorników. Problem ten wymaga szczegółowej analizy, której celem winno być określenie dopuszczalnych wartości ciśnień magazynowania powietrza w funkcji głębokości posadowienia zbiorników.

Wyniki badań na modelach numerycznych, wskazują, że dla każdej głębokości istnieje pewien preferowany, możliwy do przyjęcia z punktu widzenia zasad geomechaniki, przedział ciśnień wewnętrznych. W tym aspekcie największa i najmniejsza wartość ciśnienia sprężonego powietrza jest jednoznacznie określona faktem pojawienia się w jakimkolwiek miejscu na konturze komory granicznego stanu wytężenia.

Z analizy obliczeń wynika, że wzrost głębokości lokalizacji zbiorników, pociąga za sobą konieczność utrzymywania w ich wnętrzu odpowiednio dużego ciśnienia minimalnego, przy czym wartość tego ciśnienia w pewnym stopniu zależy również od kształtu zbiorników (rys. 6.16 – rys. 6.17). W szczególności, przyjęty warunek równowagi górotworu jest spełniony, gdy minimalne ciśnienie sprężonego powietrza w zbiorniku o smukłości 2, wynosi ok. 2 MPa, gdy jego strop znajduje się na głębokości 600 m, ok. 4 MPa przy lokalizacji na 800 m i ok. 7 MPa przy lokalizacji na 1000 m (rys. 6.16). W zbiorniku o smukłości 3, minimalne ciśnienia magazynowanego powietrza muszą być nieco większe (rys. 6.17).

Wyższe wartości ciśnienia wewnątrz zbiornika wpływają korzystnie na stan wytężenia górotworu. Jednakże istnieje pewna graniczna wartość ciśnienia maksymalnego, powyżej której przekroczony zostaje warunek równowagi górotworu ze względu na naprężenia rozciągające. W praktyce mamy wówczas do czynienia ze zjawiskiem szczelinowania górotworu i utratą szczelności zbiornika. Wartość granicznych naprężeń rozciągających, nazywana ciśnieniem szczelinowania jest obliczana dla zagadnień praktycznych z pewnym współczynnikiem bezpieczeństwa związkiem (2.2). Określenie dokładnej wartości ciśnienia szczelinowania wymaga przeprowadzenia odpowiednich badań modelowych.

7. Ocena stateczności calizn ochronnych w podziemnym magazynie sprężonego powietrza

W sytuacji zapotrzebowania na dużą moc szczytową w systemie energetycznym, elektrownia gazowo-akumulacyjna może współpracować z podziemnym magazynem sprężonego powietrza, zbudowanym z większej liczby zbiorników. Głównym problemem związanym z zapewnieniem bezawaryjnej pracy elektrowni szczytowo-gazowej jest zachowanie długotrwałej stateczności podziemnych zbiorników sprężonego powietrza tak rozmieszczonych w złożu soli, by pozostawione między nimi filary były szczelne i stateczne. Z punktu widzenia geomechaniki taki układ jest stateczny, jeśli zachodzące w nim procesy mechaniczne mają kontrolowany i zgodny z prognozami przebieg. Zatem stateczność podziemnego magazynu sprężonego powietrza jest zachowana wówczas, gdy obciążenia przenoszone przez filary między zbiornikami są mniejsze od obciążeń dopuszczalnych, a przemieszczenia konturów zbiorników mieszczą się w zakresie przemieszczeń prognozowanych. Tak określona stateczność magazynu jest więc ściśle zdeterminowana koncentracją naprężeń w filarach międzykomorowych. Koncentracja naprężeń i wynikające z niej wytężenie górotworu jest z jednej strony funkcją pierwotnego ciśnienia górotworu, a więc głębokości posadowienia stropów zbiorników oraz ciśnienia magazynowanego powietrza, z drugiej zaś zależy od wyługowanego kształtu komory.

Przy budowie podziemnego magazynu powietrza uzyskuje się najlepszy stopień wykorzystania złoża solnego, rozmieszczając zbiorniki w siatce trójkąta równobocznego. Odległości między nimi można wstępnie określić z analitycznego warunku wytrzymałościowego [9] w postaci:

$$\sqrt{\frac{3}{4}d^4(p_x-p_{gr})^2K(\lambda)\left[\left(\sum_{i=1}^{m}\frac{(x-x_i)^2-(y-y_i)^2}{[(x-x_i)^2+(y-y_i)^2]^2}\right)^2+\left(2\sum_{i=1}^{m}\frac{(x-x_i)(y-y_i)}{[(x-x_i)^2+(y-y_i)^2]^2}\right)^2\right]}+p_x^2(1-2\nu)<R_{CD} \qquad (7.1)$$

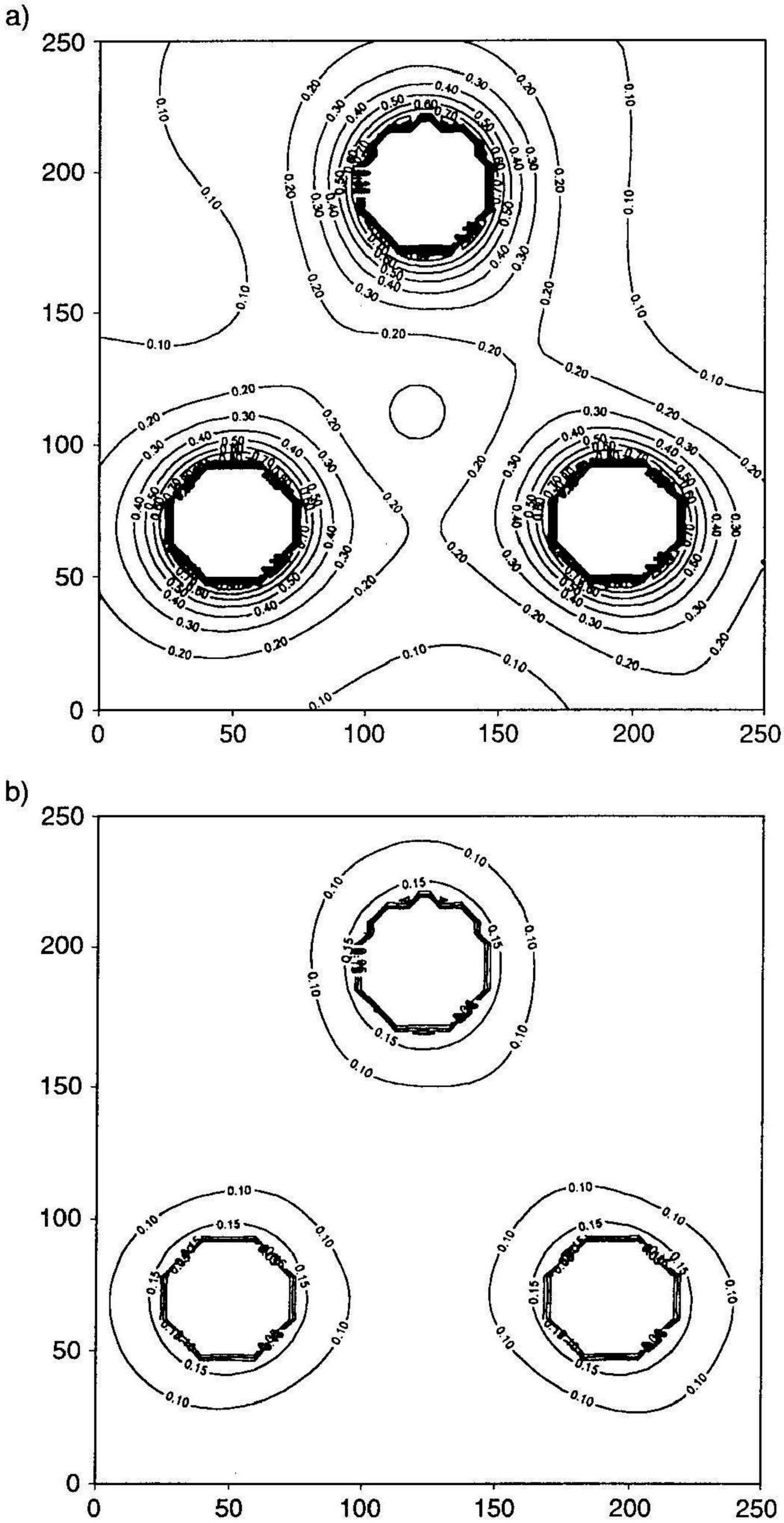
gdzie:

$K(\lambda)$ – współczynnik zależny od przyjętej geometrii układu zbiorników,
d – długość poziomej osi zbiornika,
l – odległość między osiami zbiorników,
m – liczba zbiorników w polu magazynowym,
x_i, y_i – współrzędne środków geometrycznych zbiorników,
R_{CD} – długotrwała wytrzymałość soli kamiennej

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń można stwierdzić, że warunek ten jest spełniony dla układu zbiorników w siatce trójkątnej o module l:d = 3, co odpowiada odległości 160 m między osiami zbiorników. Dla tak oszacowanej geometrii magazynu, składającego się z trzech zbiorników o jednakowej pojemności 230 000 m^3 i smukłości równej 3, zbudowano jego model numeryczny i zlokalizowano go na głębokości 600 m.

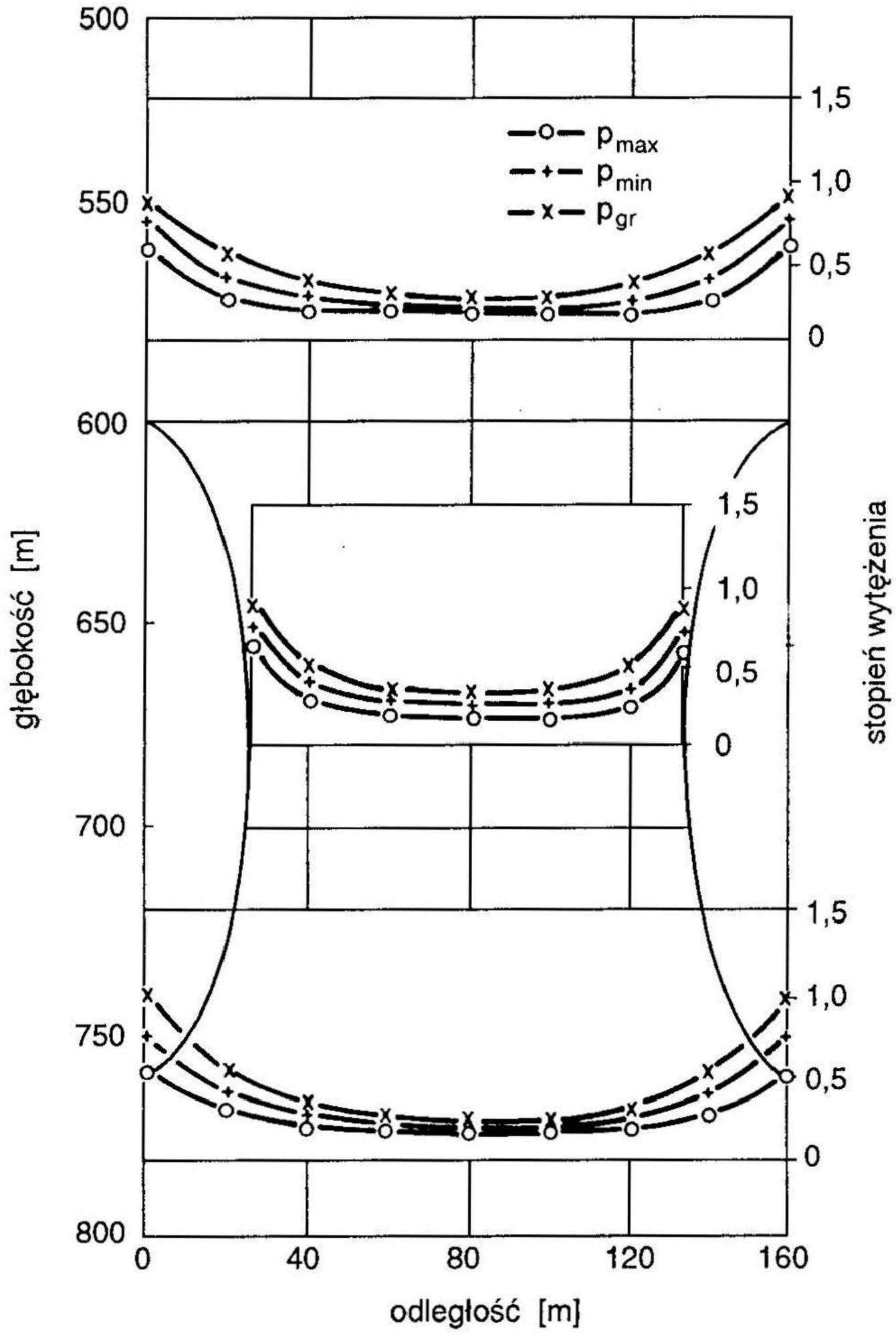
Badanie przebiegu zmienności stopnia wytężenia górotworu w otoczeniu podziemnego magazynu sprężonego powietrza wskazuje, że osiąga ono wartości maksymalne na konturze każdego zbiornika, przy czym im mniejsze jest ciśnienie magazynowanego powietrza, tym większą wartość osiąga wytężenie. W końcowej fazie pracy turbiny w cyklu interwencyjnym, przy ciśnie-

niu powietrza 4,2 MPa, wytężenie górotworu wewnątrz filarów międzykomorowych wzrasta, a na konturach zbiorników zbliża się do wartości granicznych (rys.7.1).



Rys. 7.1. Mapa izolinii stopnia wytężenia górotworu w filarze między zbiornikami sprężonego powietrza przy ciśnieniu granicznym (a) i maksymalnym ciśnieniu roboczym (b); strop zbiorników na głębokości 600 m

Rozkłady stopnia wytężenia górotworu na poziomie najmniejszych wymiarów filara między zbiornikami, tj. w ich połowie wysokości oraz na poziomie stropu i spągu zbiorników (rys. 7.2) jednoznacznie wskazują, że najbardziej niekorzystna sytuacja, z punktu widzenia wytężenia pozostawionych calizn ochronnych, byłaby wówczas, gdyby we wszystkich zbiornikach równocześnie obniżono ciśnienie magazynowanego powietrza do najmniejszej wartości granicznej. Przy czym o stateczności filarów i półek decyduje przede wszystkim stateczność każdego ze zbiorników, bowiem największe wartości wytężenia górotworu pojawiają się na ich konturach.



Rys. 7.2. Stopień wytężenia górotworu w półce stropowej, filarze między zbiornikami i w półce spągowej przy różnych ciśnieniach sprężonego powietrza; strop zbiorników na głębokości 600 m

Przedstawione wykresy wytężenia calizn ochronnych sugerują możliwość optymalizacji wykorzystania złoża ze względu na warunki geomechaniczne. Jednakże w praktyce stosowane są przy wymiarowaniu filarów międzykomorowych duże wartości współczynników bezpieczeństwa z uwagi na niejednorodne własności ługownicze soli i możliwość powstania połączeń między zbiornikami.

8. Metodyka geomechanicznego projektowania podziemnych magazynów sprężonego powietrza

Zrealizowane w ramach niniejszej pracy badania i przeprowadzone analizy miały na celu uchwycenie tych elementów projektowania podziemnych magazynów sprężonego powietrza, które z punktu widzenia geomechaniki mają najistotniejsze znaczenie dla zachowania długotrwałej stateczności tych podziemnych wyrobisk. Rozwiązanie tak sformułowanego problemu wymaga wyodrębnienia dwóch generalnych kierunków: dążenia do poznania procesów zachodzących w rzeczywistym górotworze oraz doskonalenia metod i narzędzi niezbędnych do modelowania tych procesów.

Lokalizacja zbiorników sprężonego powietrza w złożach soli kamiennej zobowiązuje do wnikliwego poznania własności tego ośrodka. Cel ten można zrealizować na drodze odpowiednio zaprogramowanych badań laboratoryjnych. W szczególności, niezbędnym elementem tych badań są próby wytrzymałościowe w złożonym stanie naprężeń. Dla uzyskania pełnej wiarygodności parametrów geomechanicznych, skonstruowane na podstawie badań laboratoryjnych równanie stanu górotworu solnego i formuła wytężenia krytycznego powinny zostać zweryfikowane w warunkach rzeczywistego górotworu, nawet na etapie budowy zbiorników.

Wybór sposobu numerycznego modelowania zbiorników i zjawisk zachodzących w otaczającym je górotworze musi zapewnić dokładne odwzorowanie kształtów geometrycznych i wymiarów oraz warunków obciążeniowych, także w ujęciu przestrzennym. Należy także pamiętać, że rzeczywiste charakterystyki deformacyjno-naprężeniowe soli kamiennej nie są liniowe. Z tego też względu do modelowania stanów naprężeń i przemieszczeń preferowane jest takie oprogramowanie komputerowe, które umożliwia analizę ośrodków nieliniowych.

Kolejnym etapem procesu projektowania zbiorników sprężonego powietrza jest przyjęcie kryterium oceny ich stateczności oraz określenie metodyki prowadzenia optymalizacji. O tym, czy zaprojektowane wyrobisko podziemne jest rozwiązaniem optymalnym decyduje szereg czynników technologicznych i ekonomicznych. Niektóre z nich, np. ciśnienie magazynowanego powietrza, zdeterminowane parametrami technicznymi turbiny gazowej, przedyskutowano w niniejszej pracy. Jednakże, z punktu widzenia geomechaniki, za optymalną należy uznać taką konstrukcję, która gwarantuje stateczność i długotrwałą funkcjonalność. Znany z doświadczenia związek kształtu wyrobisk górniczych ze stanem naprężenia w otaczającym je górotworze, skłania więc do poszukiwania takich kształtów zbiorników, które pozwolą uniknąć nadmiernej koncentracji naprężeń i powstawania ewentualnych stref zniszczenia. Zaproponowany warunek równowagi granicznej dla soli kamiennej narzuca określoną wartość kryterium wytrzymałościowego, jako miary zniszczenia otaczającego górotworu. Przydatność tego kryterium nie podlega dyskusji także w przypadku określania dopuszczalnych wartości ciśnienia magazynowania powietrza, a zwłaszcza ciśnienia szczelinowania górotworu.

Biorąc pod uwagę konieczność zapewnienia funkcjonalności zbiorników sprężonego powietrza w długich okresach czasu, należy również rozpatrzyć celowość sformułowania odkształceniowego kryterium długotrwałej stateczności, przy spełnionym równocześnie warunku wytrzy-

małościowym. O wartości liczbowej tego kryterium, będącego miarą dopuszczalnej konwergencji zbiornika, decydować będą przede wszystkim czynniki natury ekonomicznej, a prognozowanie zmian pojemności zbiornika w funkcji czasu wymaga znajomości reologicznego modelu górotworu solnego.

Literatura

1. Analiza złóż soli w centralnej części Polski w aspekcie wykonania w nich podziemnych zbiorników sprężonego powietrza. Praca zbiorowa, BUNT Technokop, Kraków 1991
2. Bąkowski J., Charysz W., Garlicki A., Poborski J., Werner Z.: Studium geologiczno-górnicze krajowych złóż soli. Masz. Arch. Zakł. Złóż Soli i Sur. Chem. AGH, Kraków 1975
3. Brace W.F. i in.: Dilatancy in the fracture of crystalline rocks. J.Geophys. Res. 71, 1966
4. Charakterystyka własności deformacyjno-naprężeniowych złoża soli Z.G. „Sieroszowice" w miejscu lokalizacji komory badawczej. Praca zbiorowa, Katedra Geomechaniki AGH Kraków 1993 - 1994
5. Dadlez R., Deczkowski Z. i in.: Mapa tektoniczna Cechsztyńsko-mezozoicznego kompleksu strukturalnego na Niżu Polskim. Wyd. Geologiczne, Warszawa 1980
6. Dokumentacja geologiczna złoża soli kamiennej Mogilno w kat. C2+C1. Praca zbiorowa, Arch. IG Warszawa 1974
7. Dodatek do dokumentacji geologicznej złoża soli kamiennej Mogilno. Praca zbiorowa, Arch. IG Warszawa 1982
8. Dreyer W.: Gebirgsmechanik im Salz. Stutgart 1974
9. Flisiak D.: Stan naprężenia w filarze pomiędzy komorami zbiornikowymi wykonanymi w górotworze solnym. Kwartalnik "Górnictwo", z.3. 1981
10. Flisiak D., Chudek M. i in.: Geomechanical phenomena accompanying underground mining. XV Congreso Mundial de Mineria. Madrid, 1992,
11. Flisiak D., Zorychta A i in.: Geomechaniczne zjawiska towarzyszące podziemnej eksploatacji złóż i ich wpływ na środowisko. Przegląd Górniczy 1993, nr 3
12. Flisiak D., Tajduś A.: Weryfikacja niektórych hipotez wytężeniowych dla soli kamiennej w świetle laboratoryjnych badań wytrzymałościowych. XVII Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1994
13. Flisiak D., Kłeczek Z.: Geomechaniczny model soli kamiennej ze złoża Lubińsko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego. W: "Nowe technologie w gospodarce złożami soli kamiennej w Polsce". Mat. konferencyjne OBRGSChem CHEMKOP Kraków 1994
14. Flisiak D., Kłeczek Z.: Geomechanical Research of Rock Salt in Aspect of Its Utilisations for Building Underground Storage. Rozprawy Monografie nr 19. Wydawnictwa AGH, Kraków 1994
15. Flisiak D., Kłeczek Z.: Stateczność podziemnych magazynów gazu (PMG) w świetle warunku bezpieczeństwa i ekonomii tych specyficznych wyrobisk górniczych. XVIII Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1995
16. Flisiak D. Kłeczek Z.: Geomechanical Model of Rock Salt for Stress and Stability Analysis of Underground Disposal Caverns. In: "Mine Planning and Equipment Selection". Balkema, Rotterdamm 1995
17. Flisiak D., Kłeczek Z., Radomski A.: Koncepcja zagospodarowania złoża soli Lubińsko - Głogowskiego Okręgu Miedziowego. Przegląd Górniczy 1994, nr 10
18. Flisiak J.: Zastosowanie mikrokomputerów do prognozowania deformacji górotworu. ZN AGH nr 1243, Górnictwo z.142, Kraków 1989
19. Flisiak J., Tajduś A.: Estimation of rockburst hazard basing on 3D stress analysis. In: Proc.of Int.Conf. Rockburst'97, Balkema, Rotterdam 1997
20. Garlicki A.: Złoża soli kamiennej na obszarza Podkarpacia. Geoogia i Surowce Mineralne Polski. Biuletyn IG nr 251, Warszawa 1970
21. Garlicki A., Szybist A.: Salinarne osady polskiego cechsztynu z solami potasowo-magnezowymi. Gosp. Surowcami Mineralnymi T.2, z.3-4

22. Garlicki A., Szybist A. i in.: Możliwości identyfikacji geofizycznej i rozpoznania geologicznego wysadów solnych. Masz. Arch. Zakł. Złóż Soli i Su. Chem AGH, Kraków 1988

23. Geomechaniczne badanie górotworu w aspekcie długotrwałej stateczności podziemnych zbiorników magazynowych. Dokumentacja projektu badawczego KBN nr 99047 91 02p/01, WGGiOŚ AGH Kraków 1992 -1994

24. Grabowski J., Skonieczny O.: Analiza efektywności produkcji energii elektrycznej w elektrowniach szczytowych. Energoprojekt Warszawa 1990

25. Gustkiewicz J.: Transition of rocks from the brittle to ductile state. Strain at failure as a function of confining pressure. Acta Geophysica 185

26. Jakubowski J., Tajduś A.: Metoda symulacji bloków (MSB) - nowa metoda modelowania górotworu o strukturze blokowej. XIX Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu, Ustroń 1996

27. Kłeczek Z.: Stateczność podziemnych komór zbiornikowych ługowanych w złożach soli. ZN AGH, Górnictwo z. 145, Kraków 1989

28. Kłeczek Z.: Geomechanika górnicza. Śląskie Wydawnictwo techniczne, Katowice 1994

29. Kłeczek Z., Flisiak D., Jaroszewicz Z., Radomski A.: Elektrownia szczytowo-akumulacyjna z turbiną gazową i podziemnym zbiornikiem sprężonego powietrza w kopalni soli Siedlec-Moszczenica. Pracowniczy projekt wynalazczy nr 1583, KS Bochmia 1992

30. Kłeczek Z. Warwas S.: Wytrzymałość soli kamiennej w podwyższonych temperaturach. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Górnictwo z. 123. Gliwice 1983

31. Kryteria wytężenia górotworu solnego w aspekcie długotrwałej stateczności podziemnych wyrobisk wielkogabarytowych. Działalność statutowa Wydziału Górniczego AGH Kraków 1993 -1994

32. Kunstman A., Urbańczyk K., Hemzaczek L.: KAGA. Computer Simulation of Natural Gas Cavern. OBRGSChem Chemkop, Kraków 1990

33. Kwaśniewski M.: Dylatancja jako zwiastun zniszczenia skały. Przegląd Górniczy 1986, nr 2

34. Langer M., Kern H.: Temperatur und belastungsabhangiges Deformationsverhalten von Salzgesteinen. 5-th Int.Symposium on Salt, Northen Ohio Geol. Soc. 1987

35. Metodyka i program badań laboratoryjnych własności wytrzymałościowych i reologicznych soli dla projektów zbiorników na wysadzie Mogilno. Dokumentacja OBRGSChem X06250, Kraków 1986

36. Mrugała M.: Laboratory Study of the Time-Dependent Behavior of Salt. The Pensylvania State University, 1985

37. Ocena podziemnych kopalń soli kamiennej w Polsce pod kątem ich wykorzystania dla celów podziemnego magazynowania lub składowania odpadów. Praca zbiorowa, OBRBG Budokop Mysłowice 1992

38. Opracowanie teoretycznego modelu dla określenia stanu naprężeniowo-deformacyjnego w Komorze Ważyn KS "Bochnia". Praca zbiorowa, OBRBG Budokop Mysłowice 1994

39. Osika R.(red.): Geologia i surowce mineralne Polski. Praca zbiorowa. Wydawnictwa Geologiczne Warszawa 19970

40. Proskuriakow N.M., Permiakow R.S. i in.: Fiziko-mechaniczeskije swojstwa solannych porod. Izd. Niedra, Leningrad 1973

41. Radomski A.: Analiza bilansu przemian termodynamicznych w cyklu sprężanie-rozprężanie w aspekcie geomechanicznej oceny stateczności podziemnych zbiorników na sprężone powietrze. BUTP Ekspert, Wrocław 1996

42. Radomski A.: Analiza założeń techniczno-ekonomicznych kompleksu energetycznego zbiornik powietrza-turbina gazowa w aspekcie geomechanicznej oceny stateczności podziemnych zbiorników sprężonego powietrza. BUTP Ekspert, Wrocław 1995

43. Szybist A.: Perspektywiczne zasoby najstarszej soli kamiennej LGOM. Symp. Górnictwa Surowców Chemicznych, Kraków 1984

44. Szybist A.: Złoże soli kamiennej w LGOM. Przegląd Geologiczny 1976 z.10

45. Warwas S.: Wpływ temperatury na charakterystykę deformacyjno-wytrzymałościową soli kamiennej. Praca doktorska. Biblioteka Gł. AGH, Kraków 1991

46. Wątorska A. i in.: Prognoza wzrostu i rejonizacji zapotrzebowania mocy w okresie 1991-2000. Energoprojekt, Kraków 1991

47. Wstępne założenia do programu rozwoju elektroenergetyki do 2000 i kierunkowo do 2020 roku. Praca zbiorowa. Spółka Polskie Sieci Elktroenergetyczne. Warszawa 1990

48. Yin G. i in.: The effect of stress path on the strength of rock. In: Key Questions in Rock Mechanics. Balkema, Rotterdam 1988