



Wpływ uziarnienia soli kamiennych na tempo zaciskania się kawern solnych

Correlation between the rock-salt grain size and the rate of underground cavern convergence

Michał SŁOTWIŃSKI^{1,2}, Marta ADAMUSZEK¹

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Centrum Modelowania Procesów Geologicznych,
al. Jaworowa 19, 53-122 Wrocław, mslot@pgi.gov.pl, madam@pgi.gov.pl

² Uniwersytet Wrocławski, Instytut Nauk Geologicznych, ul. W. Cybulskiego 32, 50-205 Wrocław

¹ Polish Geological Institute – Polish Research Institute, al. Jaworowa 19, 53-122 Wrocław, mslot@pgi.gov.pl, madam@pgi.gov.pl

² Wrocław University, Institute of Geological Sciences, ul. W. Cybulskiego 32, 50-205 Wrocław

STRESZCZENIE

Tempo konwergencji podziemnych magazynów solnych jest jednym z parametrów warunkujących ich długotrwałą stabilność. Pełzanie dyslokacyjne jest powszechnie uważane za główny mechanizm deformacji w solach kamiennych odpowiedzialny za konwergencję kawern. Jest to związane głównie z faktem, że mechanizm ten dominuje dla deformacji związanej z dużymi naprężeniami różnicowymi, które są spodziewane podczas eksploatacji takich kawern. Przedstawiona w artykule analiza wskazuje, że dla szerokich zakresów możliwych stanów naprężeń w magazynach pełzanie dyfuzyjne może być drugim istotnym mechanizmem deformacji. Jest to szczególnie istotne dla kawern, w których magazynowane są substancje gazowe, gdyż stan naprężeń waha się istotnie w zależności od poziomu wypełnienia gazem. Analiza danych z sześciu otworów wiertniczych na terenie wyniesienia Łeby wykazała, że przy uwzględnieniu pełzania dyfuzyjnego tempa odkształcenia, a co za tym idzie, tempa zaciskania się kawerny, w niektórych częściach profilu mogą być znacznie wyższe niż w przypadku obliczeń opartych wyłącznie na zjawisku pełzania dyslokacyjnego. Różnica ta może sięgnąć nawet kilku rzędów wielkości. Szczególnie istotną cechą jest tu rozmiar uziarnienia, który ma kluczowe znaczenie dla intensywności pełzania dyfuzyjnego. Przedstawione w artykule badania wskazują, że dla prawidłowej oceny tempa zaciskania się kawern istotne jest uwzględnienie dwóch mechanizmów deformacji zarówno pełzania dyslokacyjnego jak i dyfuzyjnego

ABSTRACT

Convergence rate is one of the important parameters that influence the long-term stability of underground storage caverns situated in rock-salt deposits. Dislocation creep is generally considered to be the main deformation mechanism responsible for the cavern convergence. This is mainly related to the fact that dislocation creep dominates during the deformation process, at high differential stresses that are expected to occur around the salt cavern. However, in this paper, we present an analysis showing that, at large ranges of probable differential stresses around the caverns, diffusion creep can also become a significant deformation mechanism. That is of special importance for gas storage cavern construction, since the stress state around the cavern is highly dependent on the pressure of gas within the cavern, and the latter varies significantly throughout the gas injection-withdrawal cycle. Our analysis of the data collected from six selected boreholes located in the Łeba Elevation (northern Poland) shows that incorporation of the diffusion creep in the convergence rate calculation can lead to significantly higher values, as compared to our analysis when only dislocation creep is considered. The difference can reach several orders of magnitude. The salt grain size is especially important since it strongly influences the pressure solution creep. Our paper shows that both dislocation and diffusion creep should be employed in the study intended to obtain accurate prediction of cavern convergence rates.

Słowa kluczowe: sole kamienne, pełzanie dyfuzyjne, pełzanie dyslokacyjne, wyniesienie Łeby, kawerny magazynowe, konwergencja kawern

1. WSTĘP

W związku ze zmianami w gospodarce energetycznej wywołanymi polityką klimatyczną oraz kwestiami bezpieczeństwa energetycznego zwiększa się zarówno w skali tak globalnej jak i krajowej zapotrzebowanie na podziemne magazynowanie substancji – gazu ziemnego, ropy naftowej, sprężonego powietrza, dwutlenku węgla i wodoru. Podziemne magazynowanie substancji posiada wiele zalet w porównaniu do składowania naziemnego: niższy koszt, duża pojemność w porównaniu do zajmowanego terenu, większe bezpieczeństwo oraz szybsze tempo poboru substancji (Kłeczek i in., 2005, 2005; Kunstman i in., 2009; Caglayan i in., 2020). Jedną z korzystnych form podziemnego magazynowania substancji jest magazynowanie w kawernach solnych, które są wielkich rozmiarów komorami wytwarzanymi metodami ługowniczymi w obrębie złóż soli kamiennej. Jest to związane głównie z właściwościami soli kamiennej, która charakteryzuje się niską przepuszczalnością, oraz deformacją zdominowaną przez nietworzące nieciągłości odkształcenia lepkie, zapewniając dużą szczelność magazynu (Kunstman i in., 2009).

Na terenie Polski jedną z najbardziej perspektywicznych lokalizacji pod kątem podziemnego składowania substancji jest wyniesienie Łeby (Czapowski, 2019). W obrębie tego obszaru znajdują się trzy udokumentowane złoża soli kamiennej: Zatoka Pucka, Łeba oraz Mechelinki. W złożu Mechelinki istnieje działający obecnie podziemny magazyn gazu ziemnego KPMG Kosakowo. Zaletami obszaru jest występowanie miąższych, pokładowych złóż soli kamiennej zalegających na odpowiedniej głębokości oraz bliskość morza, ułatwiająca utylizację solanki poługowniczej (Czapowski i Tomassi-Morawiec, 1985, 2006; Czapowski, 1987, 1998, 2019). Jednakże, określenie przydatności danego obszaru do budowy magazynów kawernowych jest złożonym procesem, wymagającym oprócz określenia parametrów fizycznych i chemicznych skał także cech mechanicznych ośrodka. Te ostatnie mają kluczowe znaczenie dla szczelności i stabilności kawern, decydują bowiem zarówno o tempie lepkiego zaciskania się kawern jak i o jej podatności na deformacje kruche.

Analiza tempa zaciskania się kawern wymaga dobrania właściwego prawa pełzania, a także określenia odpowiednich parametrów materiałowych. Za główny mechanizm deformacji odpowiedzialny za zaciskanie się kawern powszechnie uważa się pełzanie dyslokacyjne. Mechanizm ten był uwzględniany jako jedyny mechanizm pełzania w zdecydowanej większości prac biorących pod uwagę lepkie odkształcenia przy modelowaniu kawern magazynowych np. Heusermann i in. (2003), Zhang i in. (2015), Böttcher i in. (2017), Cała i in. (2018), Ma-

Keywords: rock salt, diffusion creep, dislocation creep, Łeba Elevation, underground storage caverns, cavern convergence

1. INTRODUCTION

In view of the changes in energy management caused by the climate policies and the issues of energy security, the demand for the underground storage of substances (natural gas, crude oil, compressed air, carbon dioxide, or hydrogen) has been increasing nationally and internationally. Underground storage of substances presents a number of advantages in comparison to ground level facilities: lower costs, large volumes in comparison to surface area of the facility, high security, and high rate of substance withdrawal (Kłeczek et al. 2005, 2005; Kunstman et al. 2009; Caglayan et al. 2020). Substance storage in underground salt caverns is one of the most beneficial forms of storage since the salt caverns provide large volume spaces within rock salt, produced by leaching methods. The advantage lies in the rock salt properties, including low permeability and deformation dominated by viscous creep, preventing rock discontinuity and assuring good tightness of the facility (Kunstman et al. 2009).

The Łeba Elevation is one of the prospective sites for underground storage in Poland (Czapowski 2019). That area contains three documented salt deposits: the Bay of Puck, Łeba, Mechelinki. The Kosakowo Underground Gas Storage is located in the Mechelinki salt deposit. One notable benefit of the area region is the presence of reasonably thick rock salt deposits situated at appropriate depths in proximity to the Baltic Sea. The vicinity of the sea eases the brine disposal after cavern leaching (Czapowski and Tomassi-Morawiec 1985, 2006; Czapowski 1987, 1998, 2019). However, usability of a given area for the construction of underground storage facilities is a complex process that requires determination of physical and chemical parameters of rocks, as well as mechanical properties of the rock mass. The latter is of key importance for the cavern tightness and stability, as such properties are crucial for the rate of viscous convergence of caverns and their susceptibility to brittle deformations.

An analysis of the cavern convergence rate requires the selection of a proper creep law, as well as determination of proper material parameters. Dislocation creep is generally considered to be the main deformation mechanism that is responsible for cavern convergence. The majority of numerical models concerning the geomechanical behavior of salt caverns consider primarily viscous deformation, realised through dislocation creep exclusively. (e.g. Heusermann et al. 2003; Zhang et al. 2015; Böttcher et al. 2017; Cała et al. 2018; Makhmutov et al. 2020, Habibi et al. 2021). Recent studies indicate, however, that diffusion creep can be essential for viscous deformation of rock salt, in addition to di-

khmutov i in. (2020), Habibi i in. (2021). Współczesne badania wskazują jednak, że oprócz pełzania dyslokacyjnego pełzanie dyfuzyjne może mieć istotne znaczenie podczas deformacji lepkiej w solach (Marketos i in., 2016; Fokker i Breunese, 2022; Kumar i Hajibeygi, 2022). W zależności od stanu naprężenia, czy wielkości uziarnienia, prawo dyfuzyjne lub prawo dyslokacyjne może stanowić dominujący mechanizm deformacji (Urai i in., 1986, 2008; Cornet i in., 2017, 2018; Barabasch i in., 2022) which are used for energy storage and play an important role in the energy transition. Much of this deformation is at differential stresses of a few MPa. The vast majority of laboratory measurements of salt creep are at much higher differential stress and require extrapolation over many orders of magnitude. This extrapolation can be made more reliable by including microphysical information on the deformation mechanisms in the laboratory samples, integrated with microstructural analysis of samples deformed in natural laboratories at low differential stress. Rock salt can deform at widely different rates at the same temperature and deviatoric stress, depending on state variables such as grain size, solid solution- and second phase- impurities, crystallographic preferred orientation, water content and grain boundary structure. Both dislocation creep and dissolution-precipitation creep processes are common, but dissolution-precipitation creep (pressure solution).

Oprócz zmienności w uziarnieniu, istotną kwestią mającą wpływ na deformację w solach, jak również na jej wytrzymałość jest jej heterogeniczność. Obecność przewarstwień innych skał oraz domieszek innych minerałów oraz zmienna zawartość wody w solach mogą być przestrzennie zróżnicowane, nawet w niezaburzonych pokładach soli kamiennych. W konsekwencji może mieć to wyraźny wpływ na stateczność kawerny magazynowej (Urai i in., 2008; Cała i in., 2018; Kumar i Hajibeygi, 2022).

Celem tego artykułu jest analiza wpływu pełzania dyfuzyjnego na deformację soli w warunkach otoczenia kawerny magazynowej na substancję gazową, oraz roli jaką gra w tym procesie rozmiar uziarnienia. Do analizy wykorzystano dane litologiczne z wybranych sześciu otworów wiertniczych z obszaru wyniesienia Łeby, które pokazują wewnątrz zróżnicowanie pokładu soli kamiennych na tym obszarze. Na podstawie informacji dotyczącej uziarnienia soli kamiennych przeanalizowano możliwe tempa deformacji skał dla różnego wariantu wielkości naprężeń dyferencjalnych. Dla jednego otworu przeprowadzono rozszerzoną interpretację właściwości geomechanicznych soli w kontekście stabilności kawerny solnej, która mogłaby powstać na tym obszarze. Analizę oparto na dwóch wariantach, w których założono, że a) średnie lub b) minimalne uziarnienie soli kamiennych jest czynnikiem warunkującym stabilność kawern.

2. OBSZAR BADAŃ

Wyniesienie Łeby jest jednostką geologiczną w północnej Polsce, stanowiącą monoklinalne wyniesienie podłoża

slocation creep (Marketos et al. 2016; Fokker and Breunese 2022; Kumar and Hajibeygi 2022). Depending on the stress state or the grain size, either the diffusion law or the dislocation law can be a dominating deformation mechanism (Urai et al. 1986, 2008; Cornet et al. 2017, 2018; Barabasch et al. 2022).

In addition to the variety of grain sizes, salt heterogeneity is an essential issue that affects both bulk and localised mechanical properties of rock salt. The presence of interlayers containing other types of rock, or admixtures of other minerals, as well as water content in salt deposits, can vary within the rock-salt volume even if the deposit is not tectonically disturbed. Those properties may clearly affect the cavern stability (Urai et al. 2008; Cała et al. 2018; Kumar and Hajibeygi 2022).

The purpose of this paper is to analyse the impact of diffusion creep and the role of grain size, associated with this process, on the deformation rate of rock salt. Our analysis is based on lithological data collected from six selected boreholes of the Łeba Elevation that indicate an internal diversification of the local salt deposit. Based on rock salt grain size data, we analysed possible rock deformation rates for various differential stress values. For one borehole, we provided an extended interpretation of the geomechanical properties of salt, in the context of the stability of an underground salt cavern that could be designed on the site. In our analysis we assumed either (a) average or (b) minimum rock-salt grain sizes, as the factors determining cavern stability.

2. RESEARCH AREA

Łeba Elevation is a geological unit of northern Poland. It is a homoclinal structure of the Precambrian basement, dipping at ca. 10° in the SSE direction. The basement is covered by the sequence of the sediments of the older Paleozoic, the Polish Permian-Mesozoic Basin, and Cenozoic. On the southern side, the Łeba Elevation borders the Peribaltic Syncline (Pożaryski and Witkowski 1990). The rock salt deposits of the Łeba Elevation have the average thickness of ca. 150 m (from 0 to 225 m) and they belong to the unit of the oldest rock salt (NaCl) of the first cyclothem of Zechstein. The deposit is situated at the depth from ca. 500 m in the NW section of the Łeba Elevation to ca. 1,000 m in the SE section (Czapowski 2019). The beds belonging to higher cyclothem (Z2-Z3) do not contain any chloride formation in that area (Poborski 1961; Wagner 1988).

Given that the evaporitic formations are of bedded type and mostly undeformed, they represent a relatively simple geological structure (Czapowski and Tomassi-Morawiec 1985, 2006; Czapowski 1987, 1998). The faults present in the basement are believed to have been active prior to the deposition of rock salt and are unlikely to significantly impact the integrity of the salt layer. The diversity in rock-salt thickness

prekambryjskiego zapadającego około 10° w kierunku SSE. Podłoże to jest przykryte przez kolejno osady starszego paleozoiku, kompleks permsko-mezozoiczny basenu polskiego oraz osady kenozoiczne. Od południa wyniesienie Łęby graniczy z syneklizą perybałtycką (Pożaryski i Witkowski, 1990). Złoża soli kamiennej na obszarze wyniesienia Łęby mają średnią miąższość około 150 m (od 0 do 225 m) i należą do wydzielenia najstarszej soli kamiennej (Na1) pierwszego cyklotemu cechsztynu. Zalegają one na głębokości od około 500 w północno zachodniej części wyniesienia Łęby do około 1000 m w części południowo-wschodniej (Czapowski, 2019). Warstwy należące do wyższych cyklotemów (Z2-Z3) nie zawierają na tym obszarze utworów chlorkowych (Poborski, 1961; Wagner, 1988).

Utwory ewaporatowe, ze względu na pokładowy charakter i brak poważnych zaburzeń tektonicznych charakteryzują się stosunkowo prostą budową geologiczną (Czapowski i Tomassi-Morawiec, 1985, 2006; Czapowski, 1987, 1998). W podłożu cechsztynu istnieją wyraźne uskoki, ale są one pre-sedymen-tacyjne w stosunku do depozycji soli, i najprawdopodobniej nie mają wpływu na jej pokład. Zróżnicowanie miąższości soli kamiennej jest związane przede wszystkim ze zmienną morfologią jej spągu. Jest to efekt wypełnienia przez sól pierwotnej, złożonej morfologii zalegającego niżej anhydrytu dolnego (A1d) (Czapowski, 1987; Peryt, 1994; Czapowski i Tomassi-Morawiec, 2006). W górnej części wydzielenia Na1 dominuje sól grubokrystaliczna i wielkokrystaliczna (kryształowa), poniżej uziarnienie staje się bardziej nieregularne, a w dolnej części dominują sole średnio- i drobnokrystaliczne. Główne zanieczyszczenia w soli kamiennej stanowią anhydryt i sole potasowo-magnezowe, a w górnej części profilu także materiały ilaste, które występują w formie strzępków i warstewek. W części stropowej ich ilość przekracza 2%. W efekcie często stosuje się podział na fację soli czystych (Na1A) w części dolnej i soli zailonych (Na1B) w części górnej o średnim stosunku miąższości około 2:1 (Werner, 1978; Czapowski, 1998; Czapowski i in., 2009). W środkowej części wydzielenia Na1 lokalnie występuje poziom tzw. anhydrytu środkowego (A1s). Składa się on z jednego, rzadziej kilku siarczanowych przewarstwień w soli, o miąższości dochodzącej do kilkunastu metrów (Czapowski i Tomassi-Morawiec, 1985; Pizon i in., 1985). Oprócz anhydrytu, często występuje w nim polihalit. Polihalit był również dokumentowany w spągu wydzielenia, na granicy z anhydrytem dolnym (Werner, 1978). Poza poziomem A1s sól kamienna nie wykazuje innych miąższych (większych niż 50 cm) przewarstwień innych typów skał.

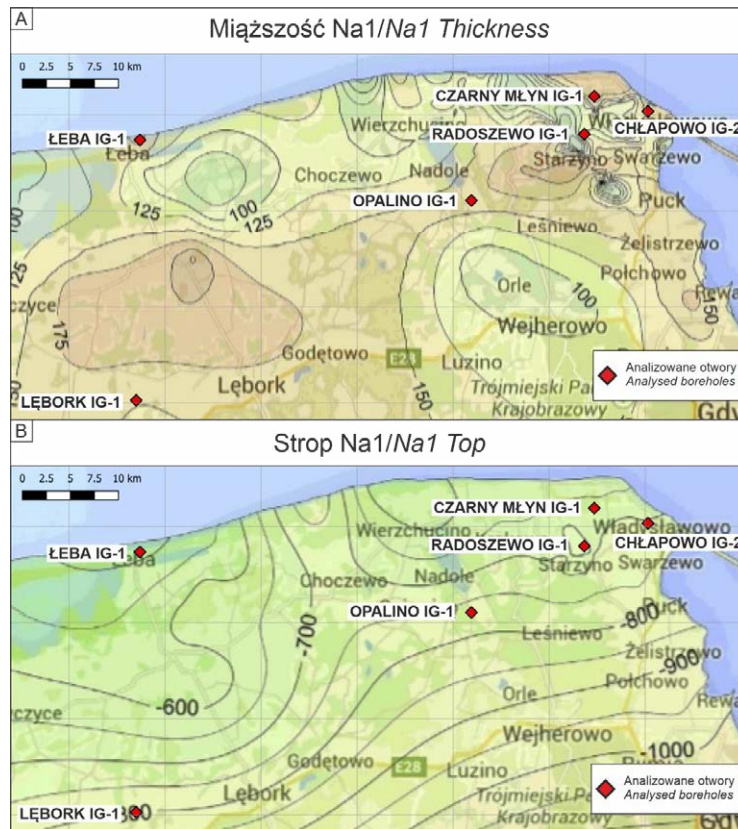
3. SELEKCJA OTWORÓW DO ANALIZY

Do analizy wybrano 6 otworów tj.: Chłapowo IG-2, Czarny Młyn IG-1, Łęba IG-1, Lębork IG-1, Opalino IG-1, oraz Radoszewo IG-1. Otwory dobrano na podstawie zróż-

is primarily associated with the variable morphology of the rock salt base, which resulted from filling in of the original complex morphology of lower anhydrite (A1d) below (Czapowski 1987; Peryt 1994; Czapowski and Tomassi-Morawiec 2006). In the upper section of the Na1 unit, coarse-grained and very coarse-grained (or crystal) salt dominates, while below, grain size becomes more irregular, with the domination of medium- and fine-grained salts in the beds below. Rock salt contains impurities, mainly anhydrite and potassium-magnesium salts. In the upper section of the profile also shows silt materials that occur in the form of shreds and thin beds. The quantity of such impurities exceeds 2% in the upper parts of the salt bed. Consequently, analysts often distinguish pure salt (Na1A) facies in the lower section and clay-bearing salt (Na1B) facies in the upper section, with the average proportion of thicknesses of ca. 2:1 (Werner 1978; Czapowski 1998; Czapowski et al. 2009). In the central section of the Na1 unit, a level of the so-called middle anhydrite (A1s) occurs locally. That is composed of either one or rarely several sulphate interlayers, with the thickness reaching up to a dozen of metres (Czapowski and Tomassi-Morawiec 1985; Pizon et al. 1985). Polyhalites occur there quite often, in addition to anhydrite. Polyhalites have also been documented in the floor of the unit, on the boundary with lower anhydrite (Werner 1978). Beside the A1s level, sulphate or clay interlayers do not exceed the thickness of 50 cm.

3. SELECTION OF BOREHOLES FOR ANALYSIS

We selected six boreholes for our analysis: Chłapowo IG-2, Czarny Młyn IG-1, Łęba IG-1, Lębork IG-1, Opalino IG-1, and Radoszewo IG-1, marked by red diamonds in Fig. 1. The boreholes were selected on the basis of their spatial distribution, rock salt depth and thickness, variation of the rock salt heterogeneity, and quality of available descriptions. The boreholes were marked with red diamonds on the maps showing Na1 thickness and depth (Fig. 1, after Ślizowski et al. 2017). Borehole Łęba IG-1, is located in the NW part of the area, where the salt layer is positioned at the most shallow depth. The top of rock salt bed is situated at the depth of ca. 500 m below the surface level and the rock salt thickness exceeds 150 m. In borehole Czarny Młyn IG-1, in the NE part of the area, the top salt level is found at the depth of ca. 650 m below the surface. In these locations, salt bed thickness reaches nearly 200 m. Boreholes Radoszewo IG-1 and Chłapowo IG-2 are situated in the eastern section of the area, where the top of rock salt bed occurs at ca. 725 and 750 m and thicknesses are ca. 125 and 150 m, respectively. Boreholes Opalino IG-1 in the southern section and Lębork IG-1 in the SW section of the area reach the Na1 salt bed at the depth of ca. 800 m below the surface. The salt-bed thickness reaches up to ca. 150 m in those boreholes.



Ryc. 1. Mapy rejonu wyniesienia Łeby przedstawiające: A - miąższość najstarszej soli kamienniej (Na1) i B – zaleganie stropu najstarszej soli kamienniej (Na1) (Ślizowski i in., 2017).

Fig. 1. Maps of the Łeba Elevation showing: A – thickness of the Oldest Halite unit (Na1) and B – depth of the Oldest Halite (Na1) top (Ślizowski et al., 2017).

nicowania ich położenia w obrębie analizowanego obszaru, miąższości soli, występowania w ich obrębie wewnętrznego zróżnicowania oraz dokładności dostępnych opisów. Otwory zaznaczono czerwonymi rombami na mapach miąższości oraz głębokości zalegania stropu Na1 (Ryc. 1, za Ślizowski i in., 2017). Otworem, w którym sól kamienna zalega najpłycej, jest znajdujący się w północno-zachodniej części obszaru otwór Łeba IG-1. Strop zlokalizowany jest tu na głębokości około 500 m p.p.t., a miąższość soli przekracza 150 m. W NE części obszaru, strop soli w otworze Czarny Młyn IG-1, znajduje się na głębokości około 650 m. Miąższość osiąga tu niemal 200 m. Otwory Radoszewo IG-1 i Chłapowo IG-2 są zlokalizowane we wschodniej części obszaru z poziomem stropu soli na głębokościach odpowiednio około 725 i 750 m i miąższościami odpowiednio około 125 i około 150 m. Otwory Opalino IG-1 w części południowej i Lębork IG-1 w części południowo-zachodniej przecinają sól Na1 na głębokości około 800 m p.p.t. Miąższość soli w tych otworach wynosi około 150 m.

4. PROFILE LITOLOGICZNE

Dane litologiczne pozyskane zostały za pośrednictwem CAG i CBDG, natomiast informacje o uziarnieniu pozyskano

4. LITHOLOGICAL PROFILES

The lithological data were obtained from the Polish CAG and CBDG database systems, and the grain size data are extracted from the work of Czapowski (1998). The borehole profile was discretised into 0.1 m intervals, for which corresponding data about lithology, lithostratigraphy and grain size data were assigned. On that basis, we developed the lithological and granulometric profiles of the analysed boreholes, presented in Fig. 2. The granulometric profiles show both average grain sizes (black line in Fig. 2.) and the ranges between the minimum and maximum grain sizes in the given interval (purple range in Fig. 2.).

Note, that the average grain size values in some cases fall beyond the range between the minimum and maximum grain size values. This is caused by the fact that the average values were determined in different intervals than those for which the minimum and maximum values were determined, the latter often being determined only in localised points

The boreholes were arranged here in accordance with the increasing top salt depth, which ranges from ca. 500 m (Łeba IG-1) to more than 800 m below the surface level (Lębork IG-1). Borehole Łeba IG-1 shows the largest average rock-salt grain size of 20 mm, occurring mainly between ca. ¼

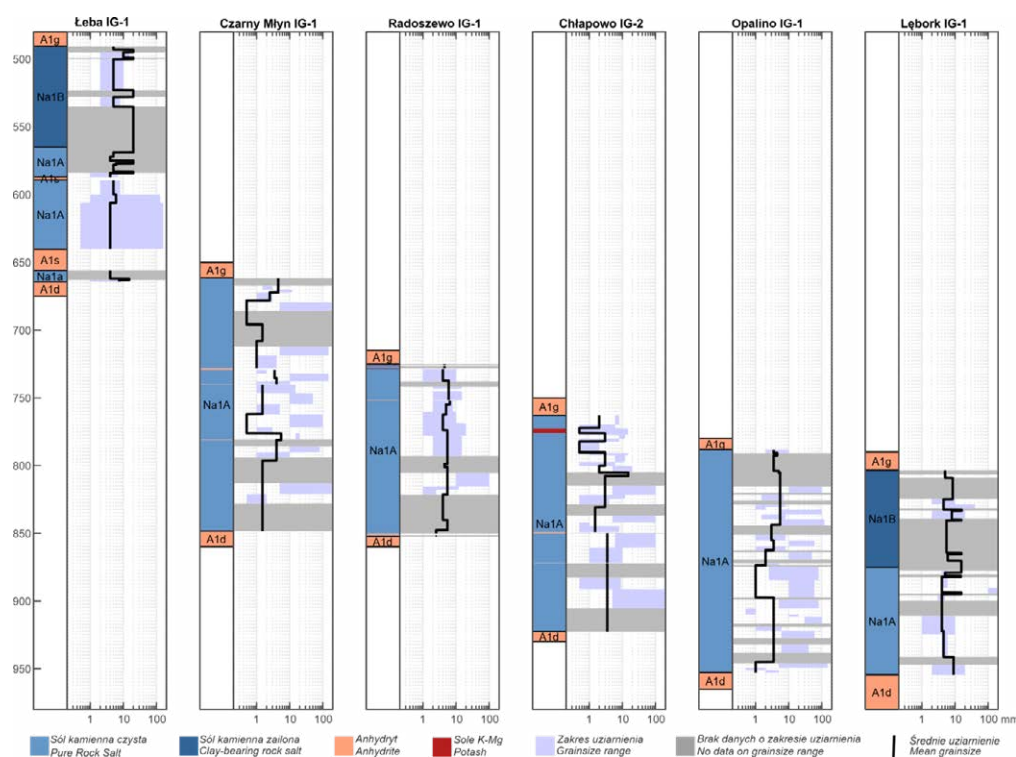
z pracy Czapowskiego (1998). Profil otworu zdyskretyzowano w interwałach 0,1 m, w których określono wydzielenia litologiczne i litostratygraficzne oraz dla NaI dodatkowo rozmiar uziarnienia. Na tej podstawie sporządzone zostały profile lito logiczno-granulometryczne analizowanych otworów i przedstawione na Ryc. 2. Profile granulometryczne prezentują zarówno średnie uziarnienie (czarna linia na Ryc. 2.) jak i zakres między minimalną oraz maksymalną wielkością uziarnienia w danym interwale (fioletowy przedział na Ryc. 2.). W większości otworów można zauważyć, że zakresy pomiędzy minimalnym i maksymalnym uziarnieniem są w sprzeczności ze średnią. Jest to spowodowane faktem, że wartości średnie były określane dla innych interwałów niż wartości skrajne.

Otwory przedstawiono w kolejności głębokości zalegania soli, która waha się od około 500 m p.p.t. (Łeba IG-1) do ponad 800 m p.p.t. (Łębork IG-1). W otworze Łeba IG-1 najwyższe średnie uziarnienie soli kamiennej, rzędu 20 mm, występuje głównie w pomiędzy około ¼ a połową profilu soli kamiennej, licząc od jej stropu. Nieznane są tu jednak bardziej szczegółowe informacje na temat zakresu skrajnych wartości uziarnienia. Powyżej dominują sole o uziarnieniu średnim rzędu około 5 mm i względnie małym zróżnicowaniu (2-10 mm). Średnia wartość około 5 mm dominuje również w dolnej połowie otworu, natomiast zróżnicowanie jest tu znacznie większe (0.5-150 mm). Występują tu też dwa przewarstwienia anhydrytu o znacznej miąższości. Pierwsze, mniejsze występuje w centralnej części pokładu soli i ma miąższość około 2 m. Drugie ma około 16 m i znajduje się w dolnej części profilu soli.

and ½ of the length of the rock-salt profile, counting from the ceiling. However, data about grain size range are not known in that case. Above that bed, average rock salt grain size of ca. 5 mm dominates, with relatively small size diversity (2–10 mm). The average value of ca. 5 mm dominates also in the lowest section of the borehole, however the grain size range is wider here (0.5–150 mm). Besides, two considerably thick anhydrite interbeds occur there as well. The first one is smaller and appears in the central section of the salt bed, with the thickness of ca. 2 m. The other one is ca. 16 m thick and is situated in the lower section of the rock salt profile.

In borehole Czarny Młyn IG-1, the average salt grain size varies considerably within the salt profile, from 0.5 to 5 mm, and the only section with a constant grain size is located close to the salt base, with grain sizes about 1.5 mm. Sharp changes of the average grain size were visible close to anhydrite interbedding. The data regarding the range of the grain size variance is highly discontinuous but the variability is significant, often exceeding an order of magnitude within a single interval. In borehole Radoszewo IG-1, the average grain size value was relatively constant along the entire profile, smoothly oscillating between 3 and 8 mm. The ranges of grain size variability are fairly small. However, the data about grain size range are available only for ca. 60% of the rock salt profile length.

Borehole Chłapowo IG-2 is characterised by small anhydrite and potassium-magnesium salts intercalations, while the average grain size varies considerably in the upper half of the profile, from 0.5 to 10 mm, and is equal to ca. 3 mm in the



Ryc. 2. Profile poziomu solnego w analizowanych otworach, z uwzględnieniem litostratygrafii, litologii oraz wielkości uziarnienia.

Fig. 2. Profiles of oldest salt layer in the examined wells. Litostratigraphy, lithology and grain size.

W otworze Czarny Młyn IG-1 średnie uziarnienie soli zmienia się w dużym stopniu w profilu pokładu soli wahając się między 0,5 a 5 mm i jedynie w strefie spągowej jest stałe na dłuższym odcinku, gdzie osiąga wartość 1,5 mm. Wyrażone skoki w średnim uziarnieniu są widoczne w sąsiedztwie przewarstwień anhydrytu. Dane na temat uziarnienia są bardzo nieciągłe, jednak zmienność jest duża i często zakres dla pojedynczego interwału przekracza rząd wielkości.

W otworze Radoszewo IG-1 średnia wartość uziarnienia nie wykazuje dużej zmienności, osiągając wartości pomiędzy 3 a 8 mm, ze zmianami o bardzo płynnym charakterze. Zakresy pomiędzy skrajnymi wielkościami ziaren są stosunkowo małe i dostępne dla około 60% długości profilu soli kamiennej.

Otwór Chłapowo IG-2 charakteryzuje się drobnymi przewarstwieniami anhydrytu i soli potasowo-magnezowych. Uziarnienie średnie w górnej połowie profilu zmienia się dość intensywnie, pomiędzy 0,5 a 10 mm, po czym osiąga wartości około 3 mm w dolnej części. Większość profilu otworu posiada opis uziarnienia minimalnego i maksymalnego, charakteryzujący się dużym zakresem zmienności, obejmującym 2 rzędy wielkości w dolnej części otworu. Otwór Opalino IG-1 charakteryzuje się małą zmiennością uziarnienia średniego (między 3 a 7,5 mm), za to dużym rozrzutem między wartościami minimalnymi i maksymalnymi, zazwyczaj wynoszącym co najmniej jeden rząd wielkości. W otworze Lębork IG-1 sól ma charakter generalnie grubokrystaliczny. Średnie uziarnienie jest równe około 10 mm na całej długości otworu. Zakres zmienności jest stosunkowo niski, a wartości wahają się pomiędzy 1 a kilkanaście mm. Jednakże, dane o zakresie uziarnienia są dostępne tylko dla około połowy profilu soli.

5. PRAWA KONSTITUTYWNE PEŁZANIA SOLI KAMIENNEJ

Deformacja soli kamiennej może zachodzić w efekcie działania różnych mechanizmów. W geologicznej skali czasowej, w deformacji soli kamiennej dominującą rolę odgrywają odkształcenia lepkie, podczas gdy odkształcenia kruche (plastyczne) i sprężyste mają wyraźnie mniejsze znaczenie (Jackson i Hudec, 2017). Głównymi mechanizmami deformacji lepkiej są pełzanie dyslokacyjne i pełzanie dyfuzyjne (pełzanie z rozpuszczania-precypitacji) (Urai i in., 1986). Mechanizmy te charakteryzują się różną wrażliwością na czynniki takie jak stan naprężeń, temperatura czy uziarnienie. Pełzanie dyslokacyjne jest relacją typu potęgowego (nienewtonowskiego) między naprężeniem a tempem odkształcenia:

$$\dot{\epsilon} = A e^{\frac{-Q_{DC}}{RT}} \sigma_d^n \quad (1)$$

gdzie $\dot{\epsilon}$ jest tempem odkształcenia, σ_d jest naprężeniem różnicowym, R jest stałą gazową, T jest temperaturą, A jest liniowym współczynnikiem materiałowym, Q_{DC} jest energią aktywacyjną pełzania dyslokacyjnego (zależną od materiału),

lower section of the profile. The majority of the profile contains description of the grain size range, which shows large of variability, up to two orders of magnitude in the lower section of the salt profile.

Borehole Opalino IG-1 is characterised by a low variability of average grain size (between 3 and 7.5 mm), but with a large dispersion between the minimum and maximum values, usually amounting to at least one order of magnitude.

In borehole Lębork IG-1, generally coarse-grained salt dominates. The average grain size is ca. 10 mm along the whole length of the salt profile. The range of variability is relatively low, and the values vary from 1 to about a dozen of millimetres. However, the grain size range data were available only for about a half of the salt profile.

5. CONSTITUTIVE ROCK-SALT CREEP LAWS

Rock salt deformation is generally a complex process involving more than one mechanism. In a geological time scale, viscous flow dominates, while brittle (plastic) and elastic deformation is much less significant (Jackson and Hudec 2017). Dislocation creep and diffusion creep (or solution-precipitation creep) are the main mechanisms of viscous deformation (Urai et al. 1986). These mechanisms are characterised by different susceptibilities to such factors as stress state, temperature, or grain size. Dislocation creep is power-law (or non-Newtonian) relationship between stress and deformation:

$$\dot{\epsilon} = A e^{\frac{-Q_{DC}}{RT}} \sigma_d^n \quad (1)$$

where $\dot{\epsilon}$ is the deformation rate, σ_d differential stress, R gas constant, T temperature, A linear material coefficient, Q_{DC} activation energy for dislocation creep (depending on the material), and n is a material-dependent stress exponent. Diffusion creep, however, was characterised by a linear (Newtonian) correlation of stress and deformation:

$$\dot{\epsilon} = B e^{\frac{-Q_{PS}}{RT}} \cdot \frac{\sigma_d}{TD^m} \quad (2)$$

Where B is a linear material coefficient, Q_{PS} activation energy for diffusion creep (depending on the material), D grain size, and m is the exponent of the grain-size function. Parameters A , B , n , m , Q_{PS} , and Q_{DC} are the experimentally determined material parameters (Urai et al. 2008; Jackson and Hudec 2017).

Dislocation creep dominates at high values of stress in coarse-grain rocks, whereas diffusion creep is characteristic for the deformation of fine-grained rock salt subjected to low stresses. Additionally, the presence of water in the inter-grain spaces can strongly promote the diffusion creep (Urai et al. 2008). In given conditions usually one of those deformation mechanisms dominates over the other, i.e. the rate of deformation resulting from the operation of one mechanism is negligi-

a n jest materiałowym wykładnikiem funkcji naprężeń. Pełzanie dyfuzyjne natomiast charakteryzuje się zależnością liniową (newtonowską) między naprężeniem a tempem odkształcenia:

$$\dot{\epsilon} = B e^{\frac{-Q_{PS}}{RT}} \cdot \frac{\sigma_d}{TD^m} \quad (2)$$

gdzie B jest liniowym współczynnikiem materiałowym, Q_{PS} jest energią aktywacyjną pełzania dyfuzyjnego (zależną od materiału), D jest wielkością ziarna, m jest wykładnikiem funkcji uziarnienia. Parametry A , B , n , m , Q_{PS} i Q_{DC} są parametrami materiałowymi, wyznaczanymi eksperymentalnie (Urai i in., 2008; Jackson i Hudec, 2017).

Dla wysokich wartości naprężeń w skałach gruboziarnistych dominuje pełzanie dyslokacyjne. Natomiast pełzanie dyfuzyjne jest charakterystyczne dla deformacji soli drobnoziarnistej poddanej niewielkim naprężeniom. Dodatkowo, obecność wody w przestrzeniach międzyziarnowych może silnie zwiększyć tempo pełzania dyfuzyjnego (Urai i in., 2008). Dla określonych warunków deformacji i wielkości uziarnienia zwykle jeden z mechanizmów deformacji dominuje nad drugim, tj. tempa odkształcenia wynikające z działania jednego z mechanizmów są pomijalnie małe w porównaniu z działaniem drugiego mechanizmu. Istotne zmiany warunków deformacji związane ze zmianą np. wartości naprężeń różnicowych, temperatury, rekrytalizacją mogą prowadzić do zmiany dominującego mechanizmu deformacji.

Aby prawidłowo opisać dynamikę takiego systemu jakim jest m.in. eksploatacja podziemnych magazynów, konieczne jest uwzględnienie obu mechanizmów w jednym prawie konstytutywnym. W niniejszej pracy używany jest model bilinearny, gdzie tempo odkształcenia dla określonych warunków (wielkości uziarnienia, temperatury oraz wielkości naprężeń) jest wyrażone jako tempo odkształceń wynikające z działania mechanizmu dominującego:

$$\dot{\epsilon} = \begin{cases} \dot{\epsilon}_{DC}, & \text{gdy } \dot{\epsilon}_{DC} \geq \dot{\epsilon}_{PS} \\ \dot{\epsilon}_{PS}, & \text{gdy } \dot{\epsilon}_{DC} < \dot{\epsilon}_{PS} \end{cases} \quad (3)$$

6. PARAMETRY PEŁZANIA DLA SOLI KAMIENNEJ

W literaturze występuje wiele zestawów parametrów materiałowych dla soli kamiennej. Zostały one wyznaczone eksperymentalnie w różnych wariantach naprężenia, temperatury i ciśnienia dla różnych soli kamiennych (syntetycznych i naturalnych). Przykładowe zestawy wartości parametrów, wraz z warunkami (σ , P , T), w których przeprowadzony był eksperyment, zaprezentowane zostały w Tabeli 1.

Przebieg zależności naprężenia różnicowego od tempa odkształcenia dla a) różnych zestawów parametrów dla pełzania dyslokacyjnego oraz b) różnych uziarnień dla jednego zestawu parametrów dla pełzania dyfuzyjnego przedstawiono na Ryc. 2A. W pełzaniu dyfuzyjnym zaobserwować można

ble when compared to the influence of the other mechanism. Essential changes of the deformation conditions, associated with a change of e.g. differential stress values, temperature, or re-crystallisation, can lead to the change of the dominating deformation mechanism.

To describe correctly the dynamics of systems such as operation of underground storage facilities, it is necessary to take both mechanisms into account in one constitutive law. In the present study, we are using an bilinear model, where for a given conditions (grain size, temperature, and stress value) the rate of deformation is expressed as the rate of deformation of the dominating mechanism:

$$\dot{\epsilon} = \begin{cases} \dot{\epsilon}_{DC}, & \text{gdy } \dot{\epsilon}_{DC} \geq \dot{\epsilon}_{PS} \\ \dot{\epsilon}_{PS}, & \text{gdy } \dot{\epsilon}_{DC} < \dot{\epsilon}_{PS} \end{cases} \quad (3)$$

6. ROCK-SALT CREEP PARAMETERS

The literature of the subject contains a number of material parameter sets concerning rock salt. The sets were determined experimentally for a wide range of stresses, temperatures, and pressures, for various types of rock salts (synthetic and natural). Selected sets of parameter values, together with the conditions (σ , P , T), under which a given experiment was conducted, are presented in Table 1 below.

The correlations between differential stress and rate of deformation for: (a) various sets of parameters for dislocation creep and (b) various grain sizes for one set of parameters of diffusion creep is presented in Fig. 2A. In the diffusion creep, we can observe a very large dependence of the deformation rate on grain size. A decrease of grain size by an order of magnitude leads to an increase of the rate of deformation by three orders of magnitude. The majority of the sets of parameters adopted for dislocation creep presents a similar trend of dependence between differential stress and rate of deformation, with the exception of the sets adopted by Carter et al. (1993) (a) and Taheri et al. (2020) that were determined for a typically low stresses and very high impurity content, respectively. In our analysis, we decided to use BGRa parameter set for the dislocation creep, which is motivated by similar provenience of the salt used in the experiment (Zechstein Basin, in the case of BGRa, Asse Diapir)

Fig. 2B presents the boundary between domination of the diffusion and dislocation creep. The correlation is presented for various values of temperatures (10, 30, and 50°C) that are typical for a shallow Earth's crust (within the depths up to ca. 1,500 m). Experiments indicated a little influence of temperature changes, of up to about a dozen percent, on the deformation rates.

Fig. 2B also illustrates the influence of a change in stress or grain size on the possible change of the dominating deformation mechanism. For stress equal to 3 MPa, diffusion

Tabela 1. Wybrane zestawy parametrów pełzania dla soli kamiennej.
Table 1. Select creep parameter sets for rock salt.

Parametry pełzania dyslokacyjnego Dislocation creep parameters							
Źródło Source	Lokalizacja Area	A	n	Q_{DC}	σ	P	T
		MPa ⁻ⁿ /s	-	kJ/mol	MPa	MPa	°C
Heard (1972)	Próbka syntetyczna Synthetic sample	0,12 - 5	5,5	98	1,6-47	200	23-400
Heard and Ryerson (1986)	Próbka syntetyczna Synthetic sample	0,08-0.5	5,8	96	1,6-47	200	23-400
Horseman. et al. (1992)	Avery Island	$6,5 \cdot 10^{-5}$	5,9	69,7	4,7-12,6	15	50-100
Carter et al. (1993) (a)	Avery Island	$8,1 \cdot 10^{-5}$	3,4	51,6	2.5 - ~15	jednoosiowe uniaxial	50-200
Carter et al. (1993) (b)	Avery Island	$1,6 \cdot 10^{-4}$	5,3	68,1	~5 -20,7	jednoosiowe uniaxial	50-200
BGRa – (Hunsche, 1994)	Asse, Niemcy	$2.8 \cdot 10^{-6}$	5	54	10-20	20	brak danych
Ter Heege et al. (2005a)	Próbka syntetyczna Synthetic sample	10^2-10^1	5,6	80	7,2-22,4	50	75-200
Taheri et al. (2020)	Gachsaran, Iran	2,92	2	38	17,6–32,2	15	23–90
Parametry pełzania dyfuzyjnego Solution-precipitation creep parameters							
Źródło Source	Lokalizacja Area	B	m	Q_{ps}	σ	P	T
		K/mm ³	-	kJ/mol	MPa	MPa	°C
Spiers et al. (1990)	Próbka syntetyczna Synthetic sample	$3,7 \cdot 10^{-4}$	3	24,5	0,5-2,2	jednoosiowe uniaxial	20-90

bardzo dużą zależność tempa odkształcenia od wielkości uziarnienia. Zmniejszenie wielkości ziarna o rząd wielkości prowadzi do zwiększenia tempa deformacji o trzy rzędy wielkości. Większość zestawów parametrów dla pełzania dyslokacyjnego przedstawia zbliżony trend zależności między naprężeniem różnicowym i tempem odkształcenia. Wyjątkiem są zestawy wyznaczone przez Carter et al. (1993) (a) i Taheri et al. (2020), które zostały określone dla odpowiednio, stosunkowo niskich naprężeń i wysokiej zawartości zanieczyszczeń, co mocno odbiega od warunków pozostałych cytowanych eksperymentów. Do dalszej analizy wybrano tylko zestaw parametrów pełzania dyslokacyjnego tj. BGRa, który został wyznaczony dla soli cechsztyńskich (z wysadu Asse w Niemczech).

Ryc. 2B przedstawia przebieg granicy reżimów dominacji pełzania dyfuzyjnego i dyslokacyjnego. Zależność tą przedstawiono dla różnych wartości temperatur tj. 10, 30 i 50°C, które są typowe dla płytkiej skorupy ziemskiej (głębokości do około 1500 m). Badania wskazują na niewielki wpływ

creep is a dominating deformation mechanism in salt grain of <10 mm (white square in Fig. 2). With increasing differential stress, dislocation creep starts to dominate for salt with smaller grain sizes. At differential stresses reaching 20 MPa, diffusion creep dominates only in the case of salts for which grain size have not exceeded 2 mm. The range of differential stresses in rock salt on perimeter of gas storage cavern depends on the level of gas fill and the cavern depth, which gives a range of several to few dozen MPas (e.g. Cała et al. 2018; Makhmutov et al. 2020; Cyran and Kowalski 2021; Habibi et al. 2021). The rock salt grain size between 1 and 20 mm is fairly typical for natural rock salt. These ranges define the yellow area in Fig. 2B The figure illustrates that the diffusion creep dominates under many realistic conditions.

zmian temperatury (rzędu kilku-kilkunastu procent) na tempa odkształceń. Ryc. 2B ilustruje również wpływ zmiany naprężenia lub uziarnienia na możliwą zmianę dominującego mechanizmu deformacji. Dla naprężeń równych 3 MPa, pełzanie dyfuzyjne jest dominującym mechanizmem deformacji dla ziaren soli <10 mm (biały kwadrat na Ryc. 2). Wraz z rosnącymi wartościami naprężeń różnicowych, pełzanie dyslokacyjne zaczyna dominować dla soli o coraz mniejszej wielkości ziarna. Dla naprężeń różnicowych sięgających 20 MPa, pełzanie dyfuzyjne dominuje jedynie w przypadku soli, dla których wielkość uziarnienia nie przekracza 2 mm. Zakres naprężeń różnicowych charakterystyczny dla kavern solnych w zależności od ich głębokości posadowienia oraz stopnia napełnienia waha się w granicach kilku do kilkudziesięciu MPa (np. Cała i in., 2018; Makhmutov i in., 2020; Cyran i Kowalski, 2021; Habibi i in., 2021), podczas gdy uziarnienia pomiędzy 1 a 20 mm powszechnie występują w naturalnej soli kamienniej. Zakres ten jest oznaczony żółtym obszarem na Ryc. 2B, wskazując na dominację pełzania dyfuzyjnego dla znacznej części realnie możliwych warunków.

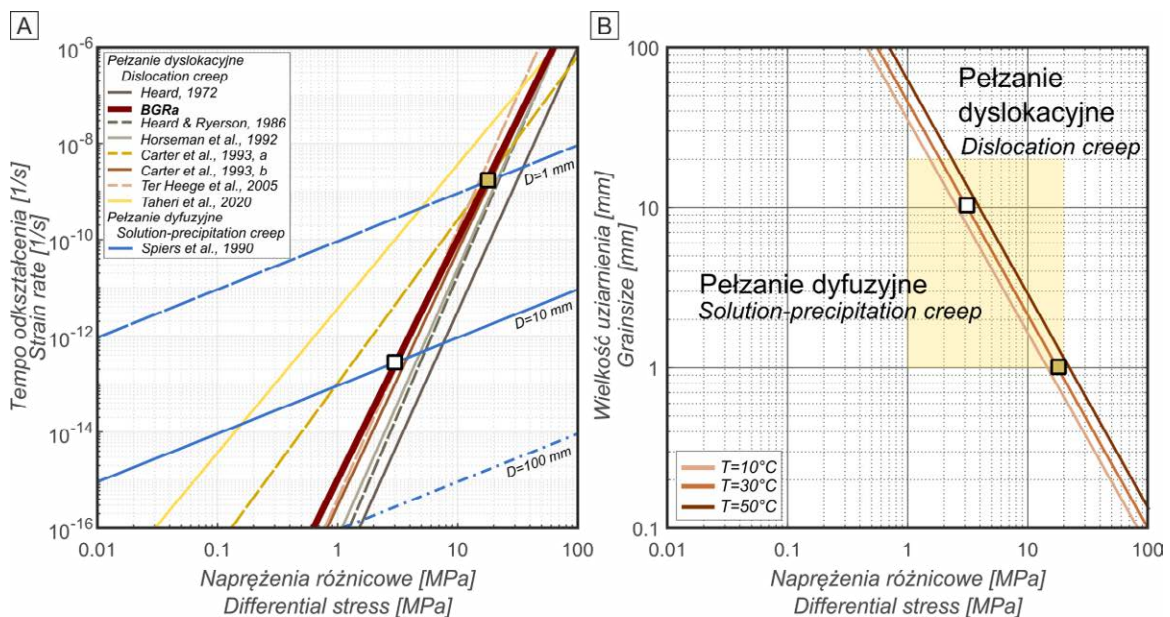
7. STAN NAPRĘŻEŃ

Dla soli kamiennych, zwłaszcza pokładowych, stan naprężeń w nienaruszonej skale zwykle przyjmuje się jako lito-

7. STRESS STATE

The stress state of pristine salt rock, especially bedded salt rock, is usually assumed to be lithostatic, unless the rock is subjected to directional tectonic stresses or the stresses resulting from differential loading by overburden (e.g. Dreyer 1982; Pudewills 1984, 2017; Wang 2003). Baumann et al. (2020) postulated that, even in the salt deposits that have not been subjected to such previous directional stresses, differential stresses may occur. Such stresses are, however, accumulated mainly around morphological steps existing in the basement, such as inactive faults, and do not exceed 0.4 MPa. Concerning stresses, Jarosiński (2009) stated, on the basis of his measurements of deformation rates in the cratonic substrates on the Łeba Elevation, that tectonic differential stresses in the salt should not exceed 1 MPa.

Assuming a non-essential role of tectonic stresses, the difference between the lithostatic pressure in the rock mass (overburden load) and the pressure of the gaseous medium stored in the underground cavern constitutes a first-order approximation of the differential stress value in the cavern walls. For the operation of the cavern, minimum and maximum allowed gas pressures are assumed. Caglayan et al. (2020) for example, specified these values as 24% and 80% of the overburden load, respectively. Gas pressure is evenly distributed



Ryc. 3. A – Zależność między naprężeniem i odkształceniem dla różnych zestawów parametrów pełzania dyslokacyjnego i dyfuzyjnego dla $T=30^{\circ}\text{C}$ i różnych rozmiarów uziarnienia; B – Granica pomiędzy dominacją reżimu pełzania dyslokacyjnego i dyfuzyjnego na wykresie zależności wielkości naprężenia różnicowego i uziarnienia dla zestawu parametrów pełzania dyslokacyjnego BGRa (Hunsche, 1994) i pełzania dyfuzyjnego (Spiers et al., 1990) dla zestawu trzech różnych temperatur ($T = 10, 30$ i 50°C). Żółtym polem oznaczono zakres warunków charakterystycznych dla kavern magazynowych.

Fig. 3. A – Stress-strain rate dependence for different dislocation creep parameter sets and pressure solution creep parameters set for $T=30^{\circ}\text{C}$ and different grainsizes; B – Dislocation creep to solution-precipitation creep transition lines in the stress and grainsize space. BGRa dislocation creep parameter set was used (Hunsche, 1994), while pressure solution creep parameters were set according to Spiers et al. (1990). Range of values typical for gas storage cavern are highlighted in yellow.

statyczny, o ile nie podlegają one kierunkowym naprężeniom tektonicznym bądź naprężeniom wynikającym z nierównomiernego obciążenia nadkładem (np. Dreyer, 1982; Pudewills, 1984, 2017; Wang, 2003). Baumann i in., (2020) postulują, że nawet w pokładach soli, nie podlegających wcześniej wymienionym kierunkowym naprężeniom, mogą występować naprężenia różnicowe. Naprężenia te są jednak zakumulowane głównie w otoczeniu progów morfologicznych w podłożu, takich jak nieaktywne uskoki, i nie przekraczają 0,4 MPa. Jeżeli chodzi o naprężenia kierunkowe, Jarosiński (2009) podaje na podstawie pomiarów tempa odkształceń w podłożu kratonicznym na obszarze wyniesienia Łeby, że tektoniczne naprężenia różnicowe w soli nie powinny przekraczać 1 MPa.

Przy założeniu braku istotnej roli naprężeń tektonicznych, za aproksymację pierwszego rzędu wartości naprężeń różnicowych na obwodzie kawerny do magazynowania substancji w stanie gazowym można uznać różnicę pomiędzy ciśnieniem w skale (ciśnieniem nadkładu) a ciśnieniem gazowego medium w kawernie. W kawernach magazynowych przyjmuje się zwykle minimalne i maksymalne ciśnienia gazu dopuszczalne podczas okresu działania kawerny. Caglayan et al. (2020) na przykład, podają wartości odpowiednio 24% i 80% ciśnienia nadkładu. Ciśnienie gazu jest równomiernie rozłożone w kawernie, podczas gdy ciśnienie nadkładu zwiększa się z głębokością i jest liczone jako

$$P_i = \sigma_{vi} = \int_0^{z_i} \rho g z dz \quad (4)$$

gdzie P_i , σ_{vi} to równoznaczne sobie ciśnienie nadkładu i wartość naprężenia pionowego na głębokości z_i , ρ to gęstość nadkładu na głębokości z , g to przyspieszenie grawitacyjne, a z to głębokość pod powierzchnią terenu. Rozkład gęstości nadkładu możliwy do pozyskania z otworowych danych geofizycznych (np. gamma-gamma) lub oszacowania z danych o litologii oraz krzywych kompaktacji. Zgodnie z powyższym modelem, najmniejsze naprężenia różnicowe występują przy stopie kawerny, a największe przy jej dnie.

8. TEMPA DEFORMACJI DLA SOLI KAMIENNYCH

Tempa deformacji dla 6 otworów z wyniesienia Łeby obliczono według modelu bilinearnego (Równanie (3)). Pełzanie dyslokacyjne opisano z użyciem prawa BGRa, gdzie $A = 2,8 \cdot 10^{-6}$ MPa⁻ⁿ/s, $Q_{DC} = 54$ kJ/mol, $n = 5$. Pełzanie dyfuzyjne opisano z kolei prawem opisanym przez Spiersa et al. (1990), to jest $B = 3,7^{-4}$ K/mm³, $Q_{PS} = 24,5$ kJ/mol, $m = 3$. Dla każdego odcinka zdyskretyzowanego profilu (podobnie jak opisano profile litologiczne w rozdziale 3) obliczono naprężenie różnicowe (σ_d), które określone zostało jako różnica pomiędzy ciśnieniem nadkładu a ciśnieniem wewnętrznym w kawernie dla odpowiednio stanu maksymalnego i minimalnego składowania. Przyjęto, że ciśnienie minimalne i mak-

within a cavern, while overburden load increases with depth and is calculated as follows:

$$P_i = \sigma_{vi} = \int_0^{z_i} \rho g z dz \quad (4)$$

where P_i , σ_{vi} are equivalent overburden loads and vertical stress value at the depth of z_i , respectively, ρ overburden density as the depth of z , g gravitational acceleration, and z is the depth under the land surface. The overburden density distribution can be obtained either from the geophysical data of a borehole (e.g. gamma-gamma) or by estimation of the lithological data and compaction curves. According the above model, the lowest differential stresses occur at the cavern's ceiling and the highest ones at the cavern's floor.

8. DEFORMATION RATES IN ROCK SALT

The rates of deformation were calculated for six boreholes of the Łeba Elevation, in accordance with the bilinear model (Equation (3)). Dislocation creep was described by the BGRa law, where $A = 2,8 \cdot 10^{-6}$ MPa⁻ⁿ/s, $Q_{DC} = 54$ kJ/mol, and $n = 5$. Diffusion creep was described by the law quoted by Spiers et al. (1990), i.e. $B = 3,7^{-4}$ K/mm³, $Q_{PS} = 24,5$ kJ/mol, and $m = 3$. Similarly to the description of the lithological profile of Section 3 above, for each section of discretised profile, the following were calculated: differential stress (σ_d) that was determined as the difference between the overburden load and internal pressures in the cavern, at the maximum and minimum states of gas filling, respectively. It was assumed that the minimum and maximum pressures constituted 20 and 80%, respectively of the overburden load in the cavern's ceiling situated under the top safety shelf of salt, with the thickness of 37.5 m (Caglayan et al. 2020). The said thickness should constitute 75% of the cavern's diameter, and it was assumed to be 50 m for the needs of further analyses. Overburden load was calculated on the basis of information concerning overlying rock lithology, depth, and rock porosity resulting from compaction curves (after Kim et al. 2018). For each borehole profile section, temperature was determined, in accordance with the geothermal gradient specified for borehole Lębork IG-1 (Majorowicz 1971), i.e. 2.2°C/100 m. The data concerning average grain size, described in Section 4 were used for our analyses.

The results of the analyses of the variance of the deformation rate, along the profiles of six boreholes, are presented in Fig. 4. Red colour marks those fragments of the profile where dislocation creep is a dominating mechanism during the rock salt deformation, while black colour marks the domination of diffusion creep. In the case of the minimum state of pressure in the cavern, or the state of highest differential stress, deformation rates are marked with a dashed line on the graph. For the maximum state of pressure in the cavern, associated with

symalne stanowi odpowiednio 20 i 80% ciśnienia nadkładu w stropie kawerny, która znajduje się pod półką stropową soli o miąższości 37,5 m (zgodnie z Caglayan et al., 2020) miąższość ta powinna stanowić 75% średnicy kawerny, którą na potrzeby dalszej analizy przyjęto 50 m). Ciśnienie nadkładu obliczone zostało na podstawie informacji dotyczącej litologii skał nadległych, głębokości oraz porowatości wynikającej z krzywych kompaktacji (krzywe za: Kim i in., 2018). Temperaturę dla każdego odcinka profilu otworu wyznaczono zgodnie z gradientem geotermicznym określonym dla otworu Lębork IG-1 (Majorowicz, 1971) tj. 2,2 °C/100 m. Do analizy wykorzystano dane dotyczące średniego uziarnienia opisane w rozdziale 4.

Wyniki analiz zmienności tempa odkształcenia wzdłuż profilu 6 otworów przedstawiono na Ryc. 4. Kolorem czerwonym zaznaczono fragmenty w profilu, w których dominującym mechanizmem deformacji soli jest pełzanie dyslokacyjne, natomiast kolorem czarnym zaznaczono dominację pełzania dyfuzyjnego. Dla stanu minimalnego ciśnienia w kawernie, a więc stanem skutkującym największą wartością naprężeń różnicowych tempa odkształceń oznaczono linią przerywaną, natomiast dla stanu maksymalnego ciśnienia w kawernie, związanego z minimalną wartością naprężeń różnicowych tempa te oznaczono linią ciągłą. W profilach otworów Łeba IG-1, Radoszewo IG-1 i Lębork IG-1 dla największych naprężeń różnicowych dominuje w pełni pełzanie dyslokacyjne, którego tempo zwiększa się wraz z głębokością, osiągając maksymalną wartość (około 10^{-9} s⁻¹) w dolnej części profilu soli kamiennej w otworze Lębork IG-1. W otworze Opalino IG-1 znajduje się kilka niewielkich stref, gdzie dominuje pełzanie dyfuzyjne, które zwiększa tylko nieznacznie tempo odkształceń w stosunku do oczekiwanego na podstawie pełzania dyslokacyjnego. W otworze Chłapowo IG-1 również pojawiają się tego typu strefy, tutaj jednak mogą one silnie podnieść tempo deformacji – o nawet 2 rzędy wielkości. W otworze Czarny Młyn IG-1 natomiast zdecydowanie dominuje pełzanie dyfuzyjne, z pełzaniem dyslokacyjnym uzyskującym dominację tylko na krótkich odcinkach. Zwiększa ono tempo odkształcenia o 2 rzędy wielkości w stosunku do spodziewanego pełzania dyslokacyjnego.

Dla minimalnego ciśnienia w kawernie, w otworze Łeba IG-1 (najpłytszym, a więc charakteryzującym się najmniejszymi wartościami naprężeń różnicowych) pełzanie dyfuzyjne dominuje dla większości długości profilu. Jedynie lokalnie występują strefy pełzania dyslokacyjnego, a ogólnie wartości tempa odkształceń są niskie i nie przekraczają 10^{-11} s⁻¹. Bardzo zmienne tempa deformacji w górnej części profilu między 10^{-14} a 10^{-11} s⁻¹ odwzorowują dużą zmienność w uziarnieniu. Podobnie wygląda sytuacja w najgłębszym otworze, Lębork IG-1. W otworze Radoszewo IG-1 dominuje pełzanie dyfuzyjne i prowadzi do nieco szybszego pełzania rzędu $5 \cdot 10^{-11}$ s⁻¹. Sytuacja wygląda podob-

the minimum value of the differential stress, deformation rates are marked with a continuous line.

In the profiles of boreholes Łeba IG-1, Radoszewo IG-1, and Lębork IG-1, dislocation creep dominates in the entire rock salt profile in the high-differential stress variant. The rate of deformation increases with depth, reaching its maximum value (ca. 10^{-9} s⁻¹) in the lowest part of the rock-salt profile in borehole Lębork IG-1.

In borehole Opalino IG-1 there are only several small zones where diffusion creep dominates, but the increase of rate of deformation above the levels expected from the dislocation creep is only marginal. In borehole Chłapowo IG-1, small zones of diffusion creep dominance appear as well; however, in that case, these zones increase the deformation rate strongly, even by up to two orders of magnitude. In borehole Czarny Młyn IG-1, diffusion creep definitely dominates along almost the entire rock salt profile, with dislocation creep operating only at short sections. That creep increases the deformation rate by up to two orders of magnitude, in respect to dislocation creep.

In the case of a maximum pressure in the cavern, for the borehole Łeba IG-1 (shallowest, hence with lowest differential-stress values), diffusion creep dominates in the major portion of the profile length. Only locally, dislocation creep zones appear, while, generally, the deformation rate values are low and do not exceed 10^{-11} s⁻¹. Highly variable deformation rates in the upper section of the profile, between 10^{-14} and 10^{-11} s⁻¹, reflect the high variability in the grain size.

The situation is similar in the deepest borehole, Lębork IG-1. In borehole Radoszewo IG-1, diffusion creep dominates and it leads to a bit faster creep over what would be expected from dislocation creep, of the order of $5 \cdot 10^{-11}$ s⁻¹. This is similar to borehole Opalino IG-1; here, however, diffusion creep can locally reach even higher rates of up to ca. 10^{-9} s⁻¹, or the rates similar to those of dislocation creep at the minimum cavern fill.

In borehole Chłapowo IG-2, dislocation-creep zones appear locally, although diffusion creep dominates generally. The majority of the borehole creep is much slower than that when cavern filling is at minimum, although creep can locally reach even up to $3 \cdot 10^{-9}$ s⁻¹.

In borehole Czarny Młyn diffusion creep dominates completely, reaching high rates of up to $5 \cdot 10^{-9}$ s⁻¹ in a considerable part of the borehole profile.

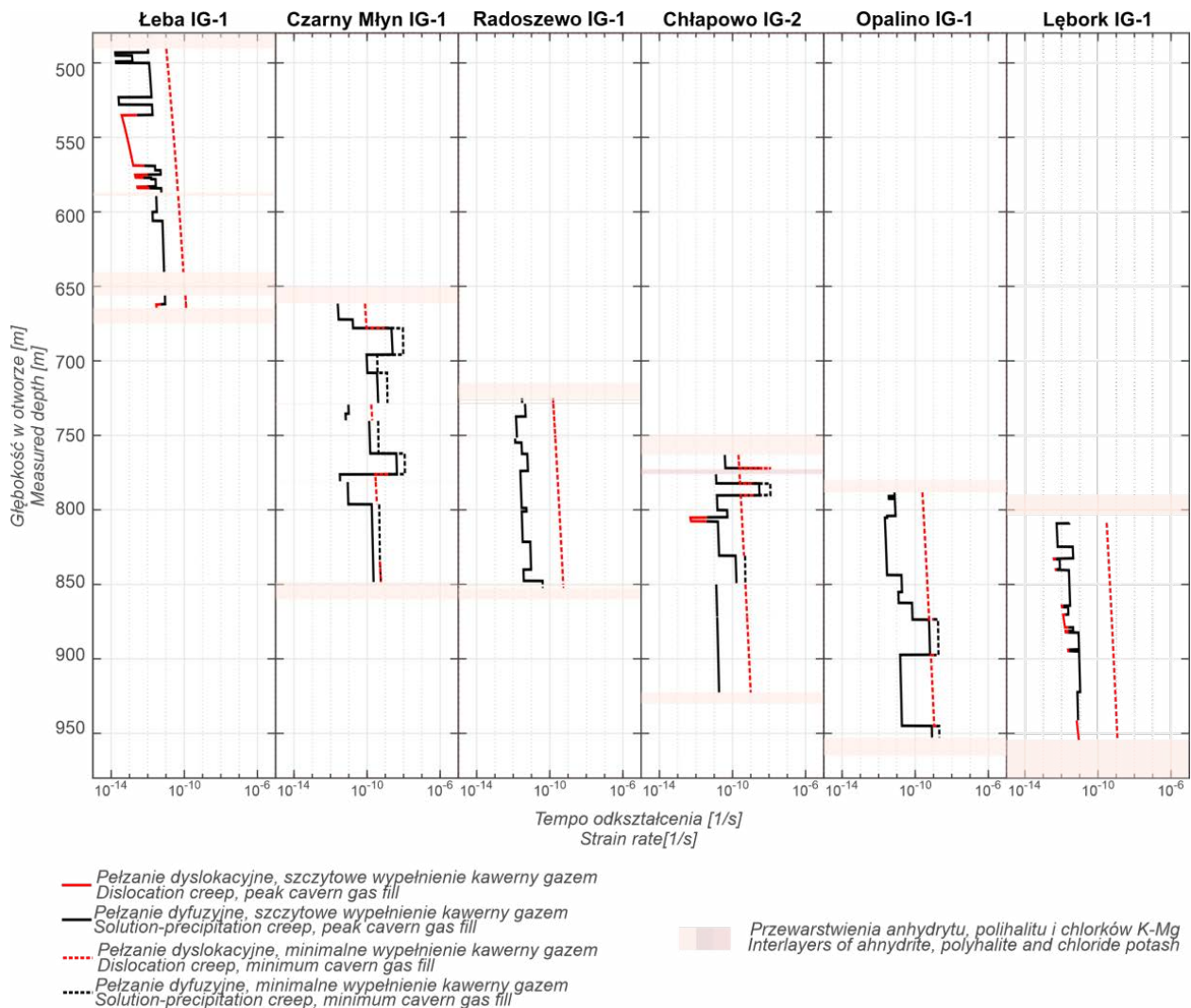
It is worth emphasising that, at both minimum and maximum cavern filling, maximum deformation rates are not always the highest in the lowest sections of the profile. That is especially well visible in boreholes Czarny Młyn IG-1 and Chłapowo IG-2, where fine-grain rock-salt interlayering, occurring in the central and/or upper sections of the profile, can locally increase deformation rates by several orders of magnitude.

nie w otworze Opalino IG-1, jednak tu pełzanie dyfuzyjne może lokalnie osiągać jeszcze wyższe tempo, do około 10^{-9} s^{-1} , czyli zbliżone do pełzania dyslokacyjnego przy minimalnym wypełnieniu. W otworze Chłapowo IG-2 lokalnie pojawiają się strefy pełzania dyslokacyjnego, ale ogólnie dominuje pełzanie dyfuzyjne. Dla większości otworu jest ono wyraźnie wolniejsze od pełzania przy wypełnieniu minimalnym, lokalnie potrafi jednak osiągnąć wartości nawet do $3 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-1}$. W otworze Czarny Młyn dominuje całkowicie pełzanie dyfuzyjne osiągając znaczne tempo do $5 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ w dużej części profilu otworu.

Warto podkreślić, że zarówno dla minimalnego jak i maksymalnego wypełnienia kawerny, maksymalne tempo deformacji nie zawsze są najwyższe w dolnej części profilu. Szczególne widoczne jest to w otworach Czarny Młyn IG-1 oraz Chłapowo IG-2, gdzie drobnoziarniste przewarstwienia soli kamiennych występujące w środkowej i/lub górnej części profilu lokalnie zwiększają tempo deformacji o kilka rzędów wielkości.

We calculated possible initial cavern convergence rates for the previously calculated deformation rates (Fig. 5), using the assumed cavern diameter of 50 m. We should note that since the deformation rate means a proportional (%) change of the dimension in a unit of time, the cavern's convergence rate will be decreasing together with cavern's dimensions. Our results are presented here for both minimum and maximum cavern fill. We also marked (with the vertical orange dashed line) the convergence rate level of 1 m a year, a value that can be recognised as admissible (Bérest and Brouard 2003).

In the case of the whole profile of borehole Łeba IG-1, the convergence rates are situated much below the admissible convergence rate, at the minimum and maximum states of cavern fill, with a safety buffer of one order of magnitude. In the cases of boreholes Lębork IG-1, Chłapowo IG-2, and Radoszewo IG-1, the safe value is only slightly exceeded at the minimum state of cavern fill, however, it is offset by the value remaining significantly below the admissible value at the maximum cavern fill. In the case of borehole Opalino



Ryc. 4. Przewidywane tempo odkształceń w profilach analizowanych otworów dla różnych stanów naprężeń w zależności od uziarnienia.

Fig. 4. Predicted rates of deformation in the analysed wells for different stress states and grain sizes.

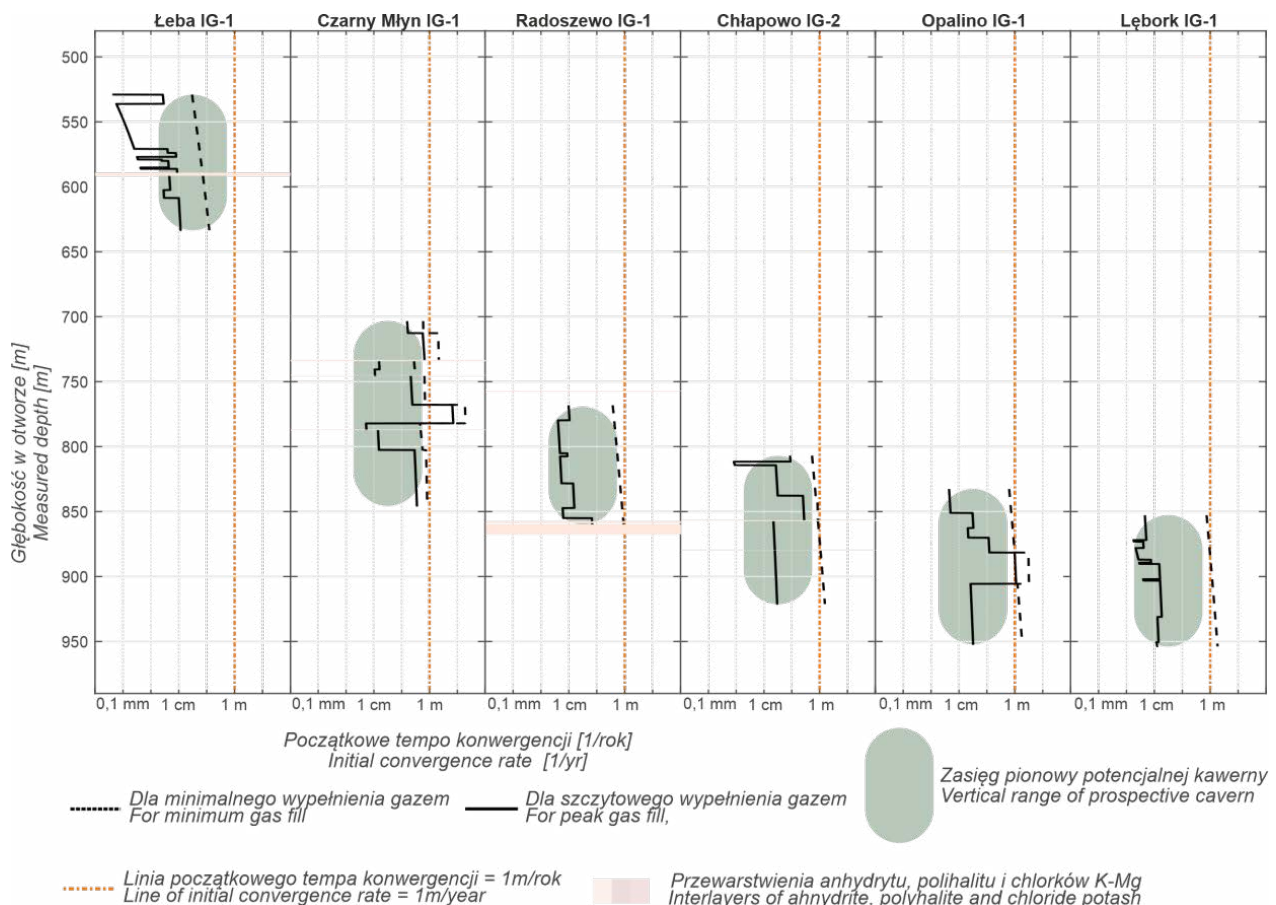
Dla obliczonych temp odkształceń wyliczone zostały możliwe początkowe tempo konwergencji kawerny (Ryc. 5) dla przykładowej średnicy kawerny równej 50 m. Należy zauważyć, że jako że tempo odkształcenia oznacza procentową zmianę wymiaru w jednostce czasu, wraz ze zmniejszaniem się wymiarów kawerny tempo konwergencji będzie maleć. Wyniki przedstawione zostały zarówno dla stanu minimalnego jak i maksymalnego wypełnienia. Zaznaczony jest również poziom tempa konwergencji 1 m rocznie, które można uznać za dopuszczalne (Bérest i Brouard, 2003) (pionowa pomarańczowa przerywana linia). Dla otworu Łeba IG-1 tempa konwergencji w całym profilu otworu mieszczą się znacznie poniżej granicznego tempa konwergencji dla minimalnego i maksymalnego stanu wypełnienia kawerny, z zapasem bezpieczeństwa jednego rzędu wielkości. W otworach Lębork IG-1, Chłapowo IG-2 i Radoszewo IG-1 wartość ta jest bardzo nieznacznie przekroczona dla stanu minimalnego napełnienia kawerny, podczas gdy w stanie maksymalnego wypełnienia mieści się w zakresie bezpieczeństwa. W otworze Opalino IG-1 tempo konwergencji lokalnie może dochodzić do 3 m na rok w stanie minimalnego wypełnienia, i nieznacznie przekraczać 1 m na rok w stanie maksymalnego wypełnienia. Sytuacja w otworze Czarny Młyn IG-1 różni się wyraźnie od pozostałych otworów,

IG-1, convergence rates can locally reach up to 3 m a year at the minimum state of cavern filling and slightly exceed 1 m a year at the maximum cavern fill.

The situation in borehole Czarny Młyn IG-1 is clearly different from that of the remaining boreholes. In addition to the zone of increased convergence in that borehole, similar to that of borehole Opalino IG-1, there is also a zone where convergence rates can reach almost 10 m a year for maximum cavern fill, or 30 m a year for minimum fill.

The above results were obtained with an assumption that the rock salt is either even-grained or uneven-grained in unstructured manner. For our experiments, we used the average grain size value; however, according to literature the median value is the most suitable a measure (Ter Heege et al. 2005b). However, since no data about median grain size were available in the analysed borehole logs, we applied the average value instead, which can constitute a certain approximation of the median.

Example photographs of the core fragments originating from borehole Chłapowo IG-2 (Fig. 6B) indicated, however, that we were locally dealing with packets of fine- and coarse-grain salt, characterised by high variability of grain size over short profile sections. In such cases, fine-grain interbeds can



Ryc. 5. Początkowe tempo konwergencji kawerny w profilach analizowanych otworów dla skrajnych stanów naprężeń i uziarnienia minimalnego.

Fig. 5. Initial cavern convergence rates in the analysed wells for different stress states and minimum grain sizes.

dla którego oprócz strefy podwyższonego tempa konwergencji podobnej do tej opisaney dla otworu Opalino IG-1, występuje tu też strefa, gdzie tempa konwergencji mogą osiągnąć wartości niemal 10 m na rok w stanie maksymalnego wypełnienia, a dla minimalnego do 30 m na rok.

Powyższe wyniki osiągnięto przy założeniu, że sól w profilu jest albo równoziarnista, albo różnoziarnista w sposób nieustrukturyzowany. W tym, podejściu użyto średniej wartości rozmiaru ziarna w interwale jako miary uziarnienia. Należy jednak zaznaczyć że wg literatury (Ter Heege i in., 2005b) najwłaściwszą wartością dla tego typu obliczeń jest mediana. Ponieważ nie dysponowaliśmy jednak informacjami o medianie dla analizowanych otworów, do badania wykorzystaliśmy wartość średnią, która może stanowić pewne przybliżenie mediany.

Przykładowe zdjęcia fragmentu rdzenia z otworu Chłapowo (Ryc. 6B) wskazują jednak, że lokalnie mamy do czynienia z pakietami warstw soli drobno- i gruboziarnistej, które charakteryzują się dużą zmiennością na niewielkich odcinkach profilu. W takim przypadku przewarstwienia soli drobnoziarnistych mogą być potencjalnie płaszczyznami odspojenia i zagrażać stabilności kawerny. W celu zbadania wpływu drobnych pakietów soli drobnoziarnistej szczegółowej analizie poddany został otwór Chłapowo IG-2. W celu analizy zmieniono w metodyce używanej w powyższych zestawieniach dwie rzeczy. Po pierwsze, zastąpiono średnią wielkość ziarna wielkością minimalną na podstawie profilu z Ryc. 2. Po drugie, w tle wykresów narysowane zostały obszary, w których wyróżniono sole równoziarniste, o uziarnieniu zróżnicowanym warstwami, uziarnieniu zróżnicowanym strefami, oraz sole różnoziarniste w sposób nieustrukturyzowany. Początkowe tempo konwergencji dla maksymalnego i minimalnego wypełnienia przedstawiono na Ryc. 6A. Trzecim wykresem jest wykres maksymalnego tempa konwergencji dla uziarnienia średniego.

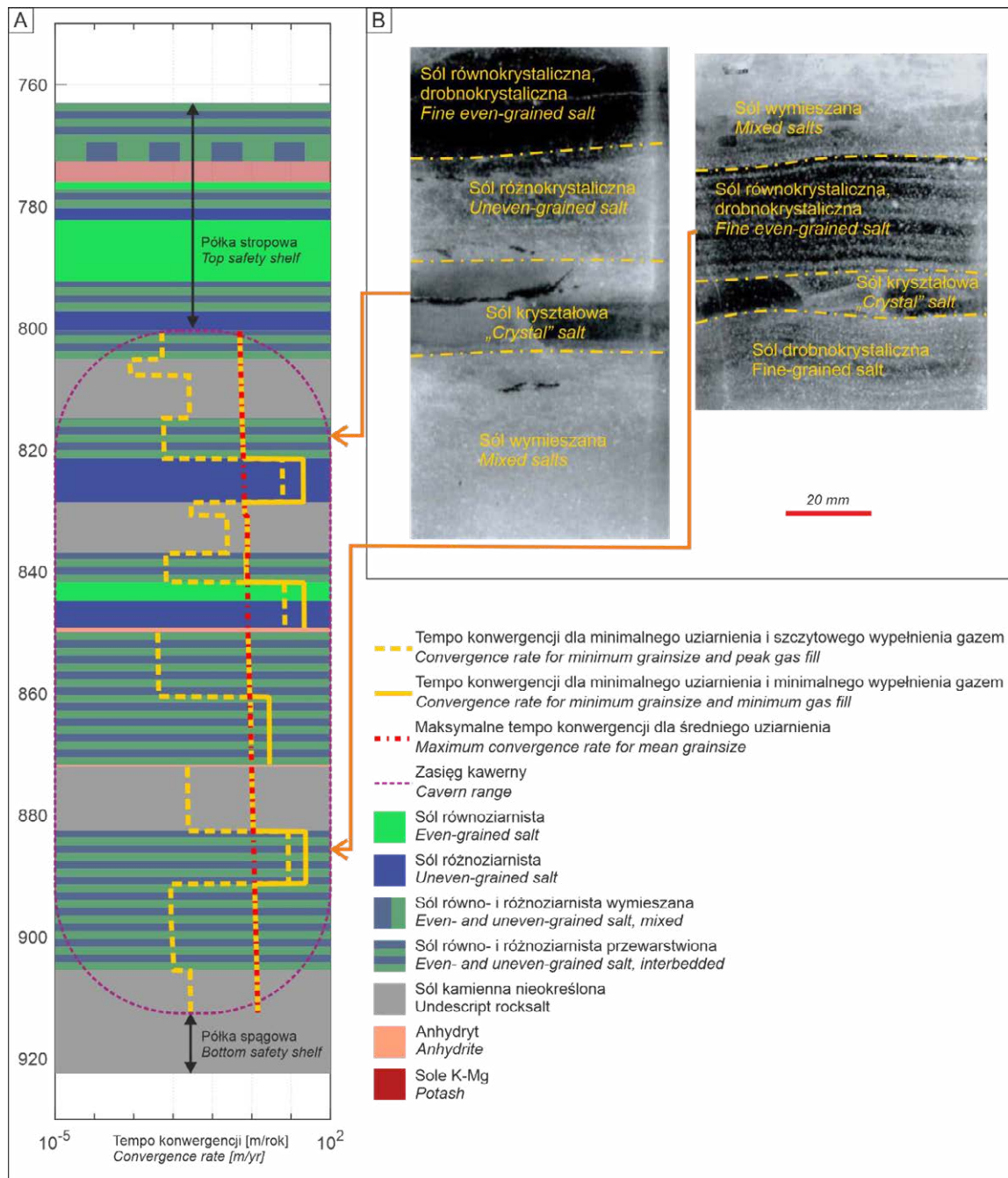
Dla średniego uziarnienia maksymalne osiągalne wartości tempa odkształceń są związane z pełzaniem dyslokacyjnym w warunkach minimalnego napełnienia kawerny. Jednak po użyciu uziarnienia minimalnego w czterech osobnych strefach wartości pełzania wzrastają o nawet ~2 rzędy wielkości w wyniku aktywacji pełzania dyfuzyjnego. W trzech z nich wartość tempa konwergencji w stanie maksymalnego wypełnienia gazem przewyższa o rząd wielkości maksymalne wartości tempa konwergencji dla uziarnienia średniego. W solach takich możemy mieć do czynienia z interwałami soli złożonych z cienkich warstewek, w obrębie których sól jest równoziarnista, ale z wielkością uziarnienia znacznie różniącą się pomiędzy poszczególnymi warstewkami. O ile dwie z tych stref podwyższonego tempa konwergencji znajdują się w mięszszych strefach soli równoziarnistych, gdzie minimalna wartość uziarnienia ma mniejsze znaczenie, to pozostałe dwie strefy znajdują się jednak w solach określonych jako przewarstwione. Wówczas dla tej części przedziału, która od-

potentially become the planes of bed sliding that presents hazard to cavern stability. To examine the influence of small fine-grain salt packets, detailed analysis was applied to borehole Chłapowo IG-2. In that analysis, two changes were applied to methodology. Firstly, the average grain size was replaced by the minimum value on the basis of the profile shown in Fig. 2. Secondly, colour patterns were plotted in the background of the chart, marking the type rock salt variability in the interval: homogeneously even-grained, variable-grained by layer, variable-grained by zone, and unstructured uneven-grained. Initial convergence rates for maximum and minimum fill are presented in Fig. 6A. The third graph presents the maximum convergence rates at average grain size values.

In the case of average grain size, the maximum deformation rate values obtained were associated with dislocation creep, in the conditions of minimum cavern fill. However, once minimum grain size was applied, in four separate zones, the creep values increased even by ~2 orders of magnitude, as a result of diffusion creep activation. In three zones, the convergence rate values, at maximum gas fill, exceeded the maximum convergence rate values predicted using average grain size values by one order of magnitude. In such intervals salt is composed of thin layers of salt that is evenly-grained within the layer, but with high contrast of grain size between the layers. Two of the zones of increased convergence rates were located in the thicker evenly-grained zones, where minimum grain-size values are of a lesser importance; however, the remaining two zones were rather situated in interbedded salt intervals. In those cases, within the fine-grain layers, it seems that it was convergence rate marked for the minimum grain size that would be the most credible for reflecting the actual course of the process.

9. DISCUSSION

In the literature on the subject, viscous properties of rock salt are described by two main deformation mechanisms: dislocation creep and diffusion creep that dominate at high and low differential stresses, respectively. Diffusion creep is, however, usually omitted when examining salt cavern stability. This is associated with the assumption that cavern operation generally causes high differential stresses, ensuring the domination of dislocation creep. However, at relatively low differential stresses within the cavern, diffusion creep can dominate in fine-grain salt beds (Fig. 3B). Numerical modes of salt-cavern behaviour that take diffusion creep into account are rather scarce in literature (e.g. Fokker and Breunese 2022; Kumar and Hajibeygi 2022). In addition, despite taking diffusion creep into account, such works do not perform detailed analysis of its influence of the process on deformation. At the same time, a number of studies appeared, with analyses of deformation in salts, e.g. around boreholes or land subsidence



Ryc. 6. A – Początkowe tempo konwergencji kawerny dla otworu Chłapowo IG-2, dla minimalnych uziarnień, na tle zmienności struktury soli kamiennej za Czapowski, 1998. B – przykłady struktur z rdzeni z otworu Chłapowo IG-2 z widoczną zmiennością soli (Czapowski, 1998).

Fig. 6. A – Initial cavern convergence rate for Chłapowo IG-2 borehole, for minimum grainsizes, with the structural differentiation of rock salt in the background, after Czapowski, 1998. B – examples of structures in the cores from Chłapowo IG-2 borehole with the variability of salt visible (Czapowski, 1998).

powiada przewarstwieniom drobnociarnistym, wydaje się, że to właśnie tempo konwergencji oznaczone dla minimalnego uziarnienia będzie najwiarygodniej oddawało rzeczywisty przebieg procesu.

9. DYSKUSJA

W literaturze własności lepkie soli kamiennej opisywane są przez dwa główne mechanizmy deformacji: pełzanie dys-

caused by the extraction of hydrocarbons, and those clearly indicate a significant role of diffusion creep in the deformation process (e.g. Marketos et al. 2016; Cornet et al. 2017, 2018).

In this paper, we employed the descriptions of six borehole profiles drilled on the Łeba Elevation area, presenting the variability within the oldest rock salt, including in particular the variability of grain size. The descriptions were used for the prediction of geomechanical behaviour of rock salt for the

lokacyjne i pełzanie dyfuzyjne, dominują dla odpowiednio wysokich i niskich naprężeń różnicowych. Pełzanie dyfuzyjne jest jednak z reguły pomijane przy badaniu stabilności kawern solnych. Związane jest to z założeniem, że działalność kawern wywołuje generalnie wysokie naprężenia różnicowe, co warunkuje dominację pełzania dyslokacyjnego. Przy stosunkowo niskich naprężeniach różnicowych w obrębie kawerny może jednak dojść do dominacji pełzania dyfuzyjnego w warstwach soli drobnoziarnistej (Ryc. 3B). Numeryczne modele zachowania się kawern solnych uwzględniające pełzanie dyfuzyjne są jednak nadal bardzo nieliczne w literaturze (np. Fokker i Breunese, 2022; Kumar i Hajibeygi, 2022). Dodatkowo, prace te mimo uwzględnienia mechanizmu pełzania dyfuzyjnego, nie analizują szczegółowo jego wpływu na deformację. Jednocześnie pojawiło się wiele prac analizujących deformację w solach, np. w otoczeniu otworów wiertniczych lub przy subsyduencji wywołanej eksploatacją węglowodorów, które wyraźnie wskazują na znaczącą rolę pełzania dyfuzyjnego w procesie deformacji (np. Marketos i in., 2016; Cornet i in., 2017, 2018).

W artykule wykorzystano opisy 6 profili otworów z obszaru Wyniesienia Łeby, przedstawiające zmienność w obrębie pokładu najstarszej soli kamiennej, w szczególności zmienność wielkości kryształów soli. Opisy te wykorzystano do prognozy zachowania się górotworu w przypadku budowy kawern solnych na tym obszarze. Warto zaznaczyć, że dobór otworów miał na celu pokazanie zmienności w obrębie badanego obszaru a nie analizę najbardziej potencjalnych lokalizacji podziemnych magazynów. Prezentowane badania oparte zostały na analizie jednowymiarowych modeli mechanicznych, gdzie własności mechaniczne soli opisane zostały przez pełzanie dyslokacyjne i dyfuzyjne. W modelu dla przyjętych wartości naprężeń różnicowych (bezpośrednio związanych z możliwym zakresem ciśnienia wewnątrz kawerny dostosowanego do głębokości posadowienia kawerny) oraz wielkości uziarnienia w solach, określono tempo odkształcenia soli. Ryc. 4 i Ryc. 5 pokazują, iż w warstwach, gdzie występują sole drobnokrystalicznych i bardzo drobnokrystaliczne może lokalnie dojść do intensywnego pełzania dyfuzyjnego. Tempo deformacji jest tu większe o nawet dwa-trzy rzędy wielkości (w zależności od stanu wypełnienia i wielkości uziarnienia soli) w porównaniu do szacunków opartych wyłącznie na pełzaniu dyslokacyjnym (Ryc. 5, Ryc. 6A). Szybkie tempo deformacji mogą w efekcie przełożyć się na szybkie tempo konwergencji kawern. Jest to szczególnie wyraźne w stanie maksymalnego wypełnienia kawerny, gdzie ze względu na obniżone naprężenia różnicowe model oparty wyłącznie na pełzaniu dyslokacyjnym nie przewiduje znaczącej konwergencji, podczas gdy uwzględnienie pełzania dyfuzyjnego wskazuje miejscami na niebezpiecznie wysokie wartości. Warto pamiętać, że przedstawione wyniki tempa deformacji reprezentują tylko początkowe ich wartości. Wiele przykładów w literaturze opisuje początkowe szybkie zaciskanie się

salt caverns that could be located in that area. It's important to emphasize that the choice of boreholes for the analysis was driven by the goal of maximizing the diversity of their parameters. The study does not intend to identify optimal locations for the future underground storage facilities.

The studies presented here were based on the analysis of one-dimensional mechanical models, where the mechanical properties of salt had been described by the processes of dislocation and diffusion creep. In that model, the rate of deformation of rock salt was determined for the assumed differential stress values (directly associated with a possible range of pressures inside the cavern, adjusted in respect of the depth of the cavern), as well as the salt grain sizes.

Fig. 4 and Fig. 5 illustrate that intensive diffusion creep may occur locally in the salt beds containing fine-grained and very fine-grained salts. In such cases, the rate of deformation is higher even by two or three orders of magnitude (depending on the status of cavern filling and salt grain size), in comparison to the estimations based exclusively on dislocation creep (Fig. 5, Fig. 6A). Consequently, high rate of deformation may cause high cavern convergence rates. That was particularly evident at the maximum cavern fill, where, due to the reduced differential stresses, the model based exclusively on dislocation creep does not produce any considerable convergence, while admission of diffusion creep indicates dangerously high deformation values in some intervals.

It is worth mentioning that the deformation rate results discussed here represent only initial deformation values. Many examples described in literature illustrate fast initial cavern convergence which becomes stable at much lower level, with time (Bérest and Brouard 2003). Nevertheless, such areas may be associated with an increased hazard.

The results of our research have demonstrated that the coarse-grained salts are the best for obtaining stable caverns. The presence of fine-grained salts can locally significantly increase the rate of deformation and, consequently, the cavern convergence rate.

In the cases where the salt deposits contain highly diverse grain sizes in the profile, more complex mechanical numerical models should be employed to achieve a comprehensive assessment of cavern stability. Nevertheless, the models presented here indicate the necessity to apply the constitutive laws that couple the diffusion-creep and dislocation-creep mechanisms in the modelling process to avoid underestimation of the cavern convergence rates.

It is worth noting that the literature on the subject describes the cases of extremely fast convergence of underground storage facilities. The cavern situated within a salt dome in Eminence, Mississippi, USA, can be a good example here: it lost 40% of its volume within two years (Bérest and Brouard 2003). Various hypotheses appeared on the reasons of such accidents, e.g. those based on vertical distribution of tempera-

kawern, które z czasem stabilizuje się na znacznie niższym poziomie (Bérest i Brouard, 2003). Niemniej jednak obszary takie mogą być związane z podwyższonym ryzykiem.

Wyniki badań wskazują, że najkorzystniejsze pod względem stabilności kawern są sole grubokrystaliczne. Obecność soli drobnokrystalicznej może znacznie lokalnie zwiększyć tempo deformacji i tym samym tempo zaciskania się kawern. W przypadku pokładów, w których występuje znaczna zmienność wielkości uziarnienia w profilu do pełnej oceny stabilności całej kawerny powinny zostać wykorzystane bardziej złożone mechaniczne modele numeryczne. Niemniej jednak przedstawione modele wskazują na konieczność zastosowania praw konstytutywnych sprzęgających mechanizm pełzania dyfuzyjnego i dyslokacyjnego w modelowaniu, w celu uniknięcia niedoszacowań w obliczeniach tempa zaciskania się kawern. Warto zauważyć, że w literaturze znane są przypadki niezwykle szybkiego tempa zaciskania się kawern magazynowych. Przykładem może być kawerna w wydzie solnym Eminence, stan Missisipi w USA straciła 40% objętości w ciągu dwóch lat (Bérest i Brouard, 2003). Pojawiły się różne hipotezy na temat powodów tego wydarzenia, np. opartych na pionowych rozkładach temperatury i ciśnienia, nie zostało ono jednak jednoznacznie wyjaśnione. W świetle wyników analiz w tej pracy wydaje się, że nie należy wykluczać szybkiego pełzania dyfuzyjnego pełzania w obrębie drobnodziarnistej soli jako potencjalnego mechanizmu współodpowiedzialnego za takie zdarzenia.

Istotnym aspektem dla analizy stabilności kawern solnych jest właściwe określenie parametrów mechanicznych soli. Większość zestawów parametrów wyznaczana jest dla soli jednorodnych, zwykle równoziarnistych, m.in. te przedstawione w Tabeli 1. Niewiele jest jednak prac opisujących w kompleksowy sposób reologię soli różnoziarnistych. Kontrowersyjną kwestią jest również opis soli warstwowanej, która w zależności od charakteru warstw może cechować się znaczną anizotropią własności mechanicznych. Dodatkowo, wiele prac wskazuje, że wpływ na wartości parametrów materiałowych czynników, takich jak zawartość wody i domieszek mineralnych (np. anhydryt, il), może być wysoka (Werner, 1978; Urai i in., 1986; Czapowski, 1998; Wilkosz i in., 2012; Adamuszek i in., 2021).

Istotną kwestią, której nasza praca nie porusza, jest dokładny rozkład naprężeń wokół kawerny. Nasza analiza używa przybliżenia pierwszego rzędu w formie różnicy pomiędzy ciśnieniem nadkładu a ciśnieniem gazu w kawernie. W rzeczywistości rozkład naprężeń wokół wyrobiska stanowi złożony problem, na który składa się wiele czynników m.in. kształt kawerny (np. Cyran and Kowalski, 2021; Liu et al., 2020) oraz potencjalnie znaczące regionalne naprężenia tektoniczne. W przypadku występowania naprężeń tektonicznych naprężenia różnicowe w soli mogą osiągać wyższe wartości i mieć znaczący wpływ na stateczność otworów, kawern

ture and pressure; however, the issue has not been completely clarified. In light of the results of the analyses described in our study, it seems that fast diffusion creep induced by low grain size of salt can be another possible mechanism responsible for the negative effects described above.

Proper determination of the mechanical salt parameters is an essential aspect of the salt cavern stability analysis. Usually, the sets of parameters are determined for uniform salts, being evenly grained, e.g., those presented in Table 1 above. Few studies describe comprehensively the rheology of diversely- unevenly-grained salts. Another controversy concerns the descriptions of bedded salt deposits, which, depending on the nature of seams, can be characterised by a considerable anisotropy of mechanical properties. Additionally, a number of studies indicated that material parameter values can be affected by such factors as high water and mineral admixture (e.g. anhydrite, or silt) contents (Werner 1978; Urai et al. 1986; Czapowski 1998; Wilkosz et al. 2012; Adamuszek et al. 2021).

An important issue that our work does not address is the detailed distribution of stresses around the cavern.. Our analysis uses a first-order approximation by assuming that differential stress is equal to the difference between overburden loading and gas pressure within the cavern.. In fact, the distribution of stresses around an underground working constitutes a complex issue affected by a number of additional factors, e.g. the shape of the cavern (e.g. Cyran and Kowalski 2021; Liu et al. 2020), as well as potentially considerable regional tectonic stresses. When tectonic stresses occur, the differential stresses of the salt deposit may reach high values and affect considerably the stability of boreholes, caverns, and other types of underground facilities (Cornet et al. 2017, 2018). In the case of the Łeba Elevation, Jarosiński (2009) mentioned that such stresses are relatively low (up to 1 MPa). Consequently, the assumption of the originally lithostatic state should not cause any significant underestimation of the cavern rate of deformation. However, it may not be directly applied to other regions, where regional tectonics may play much more important role. When we relate the results presented here to the preliminary evaluation of the possibility of constructing underground storage facilities on the Łeba Elevation, and if we consider exclusively the average grain size of salt, the majority of the boreholes considered here is characterised by adequate stability in the context of convergence rate. However, the influence of fine-crystalline salt interbedding should be further verified, using numerical simulations. Secondly, there exist many other factors, besides the convergence rate, both geomechanical and e.g. technical, economic, or environmental, that can affect the cavern construction and operation, and should be taken into account.

i innych wyrobisk (Cornet i in., 2017, 2018). W przypadku wyniesienia Łeby, jak wskazuje Jarosiński (2009) naprężenia te są jednak stosunkowo niewielkie (do 1 MPa). Założenie więc stanu pierwotnie litostatycznego nie powinno więc spowodować w tym wypadku znaczącego niedoszacowania tempa deformacji. Jednakże z tego względu wnioski z tej analizy nie mogą zostać bezpośrednio użyte dla innych obszarów, gdzie rola regionalnej tektoniki może być znacznie wyższa.

Odnosząc przedstawione wyniki do oceny możliwości budowy kawern magazynowych do obszaru wyniesienia Łeby, wstępnie, jeżeli brać pod uwagę wyłącznie uziarnienia średnie, większość analizowanych otworów charakteryzuje się wystarczającą stabilnością pod kątem tempa konwergencji. Jednakże, wpływ przewarstwień soli drobnoziarnistych powinna zostać zweryfikowana za pomocą symulacji numerycznych. Po drugie, poza tempem konwergencji istnieje wiele innych czynników zarówno geomechanicznych, jak i innych np. technicznych, ekonomicznych, środowiskowych, które mają wpływ na budowę i eksploatację kawerny i powinny być wzięte pod uwagę.

10. WNIOSKI

Na podstawie analiz tempa pełzania soli w wybranych otworach na wyniesieniu Łeby wskazano, iż w 4 przypadkach z 6 występujące w nich warunki geomechaniczne mogą pozwalać na budowę stabilnych kawern magazynowych. Wyjątkami są otwory Czarny Młyn IG-1 i Opalino IG-1, gdzie intensywne pełzanie dyfuzyjne związane z uziarnieniem może osiągnąć niebezpieczne tempa odkształceń, przy czym w otworze Opalino IG-1 przekroczenia są na granicy dopuszczalności. W takim wypadku o racjonalność konstrukcji kawerny w tym miejscu mogą zdecydować inne czynniki, np. ekonomiczne. W każdym wypadku jednak wymagane są jednak bardziej zaawansowane analizy, w tym modelowanie numeryczne, by wykluczyć potencjalne problemy związane z szybkim tempem zaciskania się kawern w strefach przewarstwień soli drobnokrystalicznych. Analizy wykazały bowiem, że przewarstwienia takie mogą doprowadzić do lokalnie znacznie podwyższonych temp odkształceń w wyniku działania pełzania dyfuzyjnego, do trzech rzędów wielkości wyższych niż w przypadku uwzględnienia wyłącznie pełzania dyslokacyjnego. Sól drobnokrystaliczna może pełzać z dużą prędkością pod wpływem pełzania dyfuzyjnego także dla stosunkowo niskich wartości naprężeń różnicowych. Jest to istotne z perspektywy eksploatacji substancji gazowych w kawernach solnych, gdzie układ naprężeń jest zmienny w wyniku zatłaczania i poboru gazu. Oznacza to, że pełzanie dyfuzyjne może nie tylko znacząco przyspieszyć tempo konwergencji, ale także utrzymywać je na wysokim poziomie przez całość cyklu użytkowania kawerny. Przedstawiony artykuł ilustruje, że pełzanie dyfuzyjne może być istotnym

10. CONCLUSIONS

Based on our analyses of salt creep rates in the selected boreholes of the Łeba Elevation, it was demonstrated that the geomechanical conditions occurring in four out of six boreholes allow for the construction of stable storage caverns. The two exceptions include boreholes Czarny Młyn IG-1 and Opalino IG-1, where intense diffusion creep, associated with particular grain size, can reach hazardous deformation rates. However, in the case of borehole Opalino IG-1, excessive deformation rates are on the verge of admissibility, so final decision is strongly dependent on other, e.g., economic factors. In each case, however, more advanced analyses are required, including those based on numerical modelling, to exclude potential problems associated with fast cavern convergence rates in the zones of fine-crystalline salt interbedding.

Our analyses indicated that, as a result of diffusion creep operation, such interbedding may locally lead to strongly increased deformation rates, up to three orders of magnitude higher than in the case of dislocation creep only. Fine-crystalline salt may creep at high rates under the diffusion creep process also at relatively low values of differential stress. That is essential from the prospect of gaseous substance storage in salt caverns, where stress distribution is changeable during injection and withdrawal cycles. That means that diffusion creep can not only significantly accelerate convergence rates, but also maintain the rates at a high level during the whole cavern lifetime. The paper presented here illustrates that diffusion creep may be an essential salt-cavern deformation mechanism and it should be taken into account in cavern stability analysis.

11. SUMMARY

Our analyses of creep rate in rock salt were performed on the basis of the data collected from six boreholes situated in the area of the Łeba Elevation in northern Poland. Dislocation and diffusion creep were both present at average and minimum grain sizes occurring along the borehole. Our analyses revealed that, for average grain sizes, the highest creep rates and, by extension, the cavern convergence rates, were associated with dislocation creep, at the state of minimum gas pressure in the cavern (and thus, at maximum difference between the pressure in the cavern and the maximum differential stresses in the surrounding rock). In the cases under discussion, no excessive creep rates occurred along the cavern profiles that would disqualify positioning caverns there. However, different results were obtained when the minimum grain size was applied. In that case, deformation was dominated by fast diffusion creep, which occurred at both types of pressure states and reached hazardous values implying potential convergence rates of tens of metres per year. However, the exact thickness and distribution of such fine-grained salt interlayers remains

mechanizmem deformacji kawern solnych i powinien być w uwzględniany przy analizie ich stabilności.

11. SUMMARY

Analysis of creep rate in rocks salt were performed on the basis of data from six boreholes localised in the area of Łeba Elevation (northern Poland). Dislocation and solution-precipitation creep were both included along with available data on average and minimal grain sizes occurring along the borehole. The analysis revealed that for average grainsizes, highest creep rates and, by extension, cavern convergence rates are associated with dislocation creep in the state of minimum gas pressure in the cavern (and thus, maximum pressure difference between cavern and surrounding rock/maximum differential stresses). In this case, no excessive creep rates that would disqualify the localisation occurred along the cavern profiles. However, different results occurred, when the minimum grainsize was used. Here, deformation was dominated by fast solution-precipitation creep, which occurred for both of the pressure states and reached dangerous values implying potential for convergence rates of tens of metres per year. However, the exact thickness and distribution of such fine-grained salt interlayers remains unknown, neither it is clear how a fast deformation within a thin interlayer could affect the cavern as a whole. While the first question can be only answered through more thorough study of grainsize during borehole core analyses, the latter can be potentially answered with numerical simulations.

12. PODZIĘKOWANIA

Praca została wykonana w ramach projektu nr 22.2003.2201.00.0 pod tytułem „Ocena stopnia szczelności oraz charakterystyka geologiczna i geomechaniczna wybranych struktur na potrzeby podziemnego magazynowania i składowania substancji na obszarze Niżu Polskiego”, finansowanego przez NFOŚiGW. Autorzy chcą podziękować dr hab. Grzegorzowi Czapowskiemu i mgr Marcie Tomaszczyk za pomoc zbieraniu danych do modelu. Dziękujemy również dr Katarzynie Cyran i drugiemu, anonimowemu recenzentowi za cenne uwagi, które pomogły wpłynęły na ostateczny kształt artykułu.

13. LITERATURA/REFERENCES

- Adamuszek, M., Tămaş, D.M., Barabasch, J., Urai, J.L., 2021. Rheological stratification in impure rock salt during long-term creep: morphology, microstructure, and numerical models of multilayer folds in the Ocelele Mari salt mine, Romania. *Solid Earth* 12, 2041–2065. <https://doi.org/10.5194/se-12-2041-2021>
- Barabasch, J., Schmatz, J., Klaver, J., Schwedt, A., Urai, J.L., 2022. Grain size dependent large rheology contrasts of halite at low deviatoric stress: evidence from microstructural study of naturally deformed gneissic Zechstein-2 rock salt (Kristallbrockensalz) from the Northern Netherlands. preprint. Tectonic plate interactions, magma genesis, and lithosphere deformation at all scales/ Structural geology and tectonics, paleoseismology, rock physics, experimental deformation/Structural geology. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-655>
- Baumann, T., Kaus, B., Popov, A., Urai, J., 2020. The 3D stress state within typical salt structures. EGU General Assembly.

unknown, neither is it clear how fast deformation within a thin interlayer can affect the cavern stability as a whole. While the former issue can be only answered through more thorough studies of grain sizes during borehole core analyses, the latter can be potentially resolved by numerical simulations.

12. ACKNOWLEDGEMENTS

This paper was written under Project no. 22.2003.2201.00.0 entitled “The evaluation of the degree of tightness, with geological and geomechanical descriptions of selected structures, for the needs of an underground substance storage or disposal facilities on the area of the Polish Lowlands,” financed by the NFOŚiGW. The authors wish to thank Dr. hab. Grzegorz Czapowski and Marta Tomaszczyk, M.A., for their assistance in the collection of modelling data. We also thank Dr. Katarzyna Cyran and another anonymous reviewer for their valuable remarks that were helpful for obtaining the finale version of our paper.

- Bérest, P., Brouard, B., 2003. Safety of Salt Caverns Used for Underground Storage Blow Out; Mechanical Instability; Seepage; Cavern Abandonment. *Oil & Gas Science and Technology* 58, 361–384. <https://doi.org/10.2516/ogst:2003023>
- Böttcher, N., Görke, U.-J., Kolditz, O., Nagel, T., 2017. Thermo-mechanical investigation of salt caverns for short-term hydrogen storage. *Environmental Earth Sciences* 76, 98. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6414-2>
- Caglayan, D.G., Weber, N., Heinrichs, H.U., Linßen, J., Robinius, M., Kukla, P.A., Stolten, D., 2020. Technical potential of salt caverns for hydrogen storage in Europe. *International Journal of Hydrogen Energy* 45, 6793–6805. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.161>
- Cała, M., Cyran, K., Kowalski, M., Wilkosz, P., 2018. Influence of the anhydrite interbeds on a stability of the storage caverns in the Mechelinki salt deposit (Northern Poland). *Archives of Mining Sciences* 1007–1025.
- Carter, N., Horseman, S., Russell, J., Handin, J., 1993. Rheology of rock salt. *Journal of Structural Geology* 15, 1257–1271.
- Cornet, J., Dabrowski, M., Schmid, D.W., 2017. Long-term cavity closure in non-linear rocks. *Geophysical Journal International* 210, 1231–1243. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx227>
- Cornet, J.S., Dabrowski, M., Schmid, D.W., 2018. Long term creep closure of salt cavities. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 103, 96–106. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.01.025>
- Cyran, K., Kowalski, M., 2021. Shape modelling and volume optimisation of salt caverns for energy storage. *Applied Sciences* 11, 423.
- Czapowski, G., 1987. Sedimentary facies in the oldest rock salt (Na1) of the Leba elevation (Northern Poland). *The Zechstein Facies in Europe*. Springer, 207–224.
- Czapowski, G., 1998. Geneza najstarszej soli kamiennej cechsztywny w rejonie Zatoki Puckiej (studium sedymentologiczne). Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- Czapowski, G., 2019. Perspektywy lokowania kawern magazynowych wodoru w pokładowych wystąpieniach soli kamiennych górnego permu (cechsztywny) w Polsce—ocena geologiczna. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*.
- Czapowski, G., Tomassi-Morawiec, H., 1985. Sedymentacja i geochemia najstarszej soli kamiennej w rejonie Zatoki Puckiej. *Przegląd Geologiczny* 33, 663–670.
- Czapowski, G., Tomassi-Morawiec, H., 2006. Geologia permskiego pokładowego złoża soli kamiennej w rejonie Zatoki Gdańskiej—aktualny stan wiedzy. *Przegląd Geologiczny* 54, 309–310.
- Czapowski, G., Tomassi-Morawiec, H., Peryt, T., Tomaszczyk, M., Chełmiński, J., 2009. Złoża permskiej soli kamiennej i potasowej w rejonie Zatoki Puckiej—budowa geologiczna i zasoby. *Przegląd Geologiczny* 57, 757–758.
- Dreyer, W., 1982. Underground storage of oil and gas in salt deposits and other non-hard rocks.
- Fokker, P.A., Breunese, J.N., 2022. Single-cavern convergence for an Ellis 2-branch power-law model. *The Mechanical Behavior of Salt X*. CRC Press, 384–394.
- Habibi, R., Moomivand, H., Ahmadi, M., Asgari, A., 2021. Stability analysis of complex behavior of salt cavern subjected to cyclic loading by laboratory measurement and numerical modeling using LOCAS (case study: Nasrabad gas storage salt cavern). *Environmental Earth Sciences* 80, 1–21.
- Heard, H.C., 1972. Steady-state flow in polycrystalline halite at pressure of 2 kilobars. Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series 16, 191–209.
- Heard, H.C., Ryerson, F., 1986. Effect of cation impurities on steady-state flow of salt. *Mineral and Rock Deformation: Laboratory Studies* 36, 99–115.
- Heusermann, S., Rolfs, O., Schmidt, U., 2003. Nonlinear finite-element analysis of solution mined storage caverns in rock salt using the LUBBY2 constitutive model. *Computers & Structures* 81, 629–638. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(02\)00415-7](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(02)00415-7)
- Horseman, S., Russell, J., Handin, J., Carter, N., 1992. Slow experimental deformation of Avery Island salt. *Proceedings of the Seventh International Symposium on Salt, Kyoto, Japan*. 67e74.
- Hunsche, U., 1994. Uniaxial and Triaxial Creep and Failure Tests on Rock: Experimental Technique and Interpretation. W: Cristescu, N.D., Gioda, G. (Red.), *Visco-Plastic Behaviour of Geomaterials*. Springer Vienna, Vienna, 1–53. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-2710-0_1
- Jackson, M.P., Hudec, M.R., 2017. *Salt tectonics: Principles and practice*. Cambridge University Press.
- Jarosiński, M., 2009. Ocena stabilności pokładów soli cechsztyńskiej na wyniesieniu Łeby pod kątem lokalizacji magazynów paliw płynnych. *Przegląd Geologiczny* 57, 763.
- Kim, Y., Lee, C., Lee, Y., 2018. Numerical analysis of sedimentary compaction: Implications for porosity and layer thickness variation. *Journal of the Geological Society of Korea* 54, 631–640. <https://doi.org/10.14770/jgsk.2018.54.6.631>
- Kłeczek, Z., Radomski, A., Zeljaś, D., 2005. *Podziemne magazynowanie*. CMAG KOMAG, Gliwice.
- Kumar, K.R., Hajibeygi, H., 2022. Influence of pressure solution and evaporate heterogeneity on the geo-mechanical behavior of salt caverns. *The Mechanical Behavior of Salt X*. CRC Press, 407–420.
- Kunstman, A., Poborska-Młynarska, K., Urbańczyk, K., 2009. Geologiczne i górnicze aspekty budowy magazynowych kawern solnych. *Przegląd geologiczny* 57, 819–928.
- Liu, W., Zhang, Z., Fan, J., Jiang, D., Daemen, J.J.K., 2020. Research on the Stability and Treatments of Natural Gas Storage Caverns With Different Shapes in Bedded Salt Rocks. *IEEE Access* 8, 18995–19007. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2967078>
- Majorowicz, J., 1971. Przebieg wartości stopnia geotermicznego w Polsce w przedziale głębokości 200-2500. *Geological Quarterly* 15, 891–900.
- Makhmutov, A.A., Kumar, K.R., Spiers, C.J., Hajibeygi, H., 2020. Cyclic Energy Storage in Salt Caverns: nonlinear finite-element modelling of rock salt creep at reservoir scale.
- Marketos, G., Spiers, C.J., Govers, R., 2016. Impact of rock salt creep law choice on subsidence calculations for hydrocarbon reservoirs overlain by evaporite caprocks: ROCK SALT FLOW AND SUBSIDENCE OVER GAS FIELDS. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 121, 4249–4267. <https://doi.org/10.1002/2016JB012892>
- Peryt, T.M., 1994. The anatomy of a sulphate platform and adjacent basin system in the Leba sub-basin of the Lower Werra Anhydrite (Zechstein, Upper Permian), northern Poland. *Sedimentology* 41, 83–113.
- Pizon, A., Peryt, T.M., Dębski, J., 1985. Środowisko powstania poli-halitów cechsztyńskich w rejonie Zatoki Puckiej. *Przegląd Geologiczny* 33, 659–663.

- Poborski, J., 1961. System permski na tzw. wyniesieniu. Łęby i związane z nim możliwości górnicze. *Przegląd Geologiczny* 9, 346.
- Pożaryski, W., Witkowski, A., 1990. Budowa geologiczna obszaru południowobałtyckiego (bez kenozoiku). *Przegląd Geologiczny* 38, 221.
- Pudewills, A., 1984. Model calculations of stresses and deformations in rock salt in the near field of heated boreholes. Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH (Germany).
- Pudewills, A., 2017. Modeling of hydro-mechanical behavior of rock salt in the near field of repository excavations. *The Mechanical Behavior of Salt—Understanding of THMC Processes in Salt*. CRC Press, 195–200.
- Spiers, C., Schutjens, P., Brzesowsky, R., Peach, C., Liezenberg, J., Zwart, H., 1990. Experimental determination of constitutive parameters governing creep of rocksalt by pressure solution. *Geological Society, London, Special Publications* 54, 215–227.
- Ślizowski, J., Lankof, L., Urbańczyk, K., Serbin, K., 2017. Potential capacity of gas storage caverns in rock salt bedded deposits in Poland. *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 43, 167–178. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2017.03.028>
- Taheri, S.R., Pak, A., Shad, S., Mehrgini, B., Razifar, M., 2020. Investigation of rock salt layer creep and its effects on casing collapse. *International Journal of Mining Science and Technology* 30, 357–365.
- Ter Heege, J.H., De Bresser, J., Spiers, C., 2005a. Rheological behaviour of synthetic rocksalt: the interplay between water, dynamic recrystallization and deformation mechanisms. *Journal of Structural Geology* 27, 948–963.
- Ter Heege, J.H., De Bresser, J.H.P., Spiers, C.J., 2005b. Dynamic recrystallization of wet synthetic polycrystalline halite: dependence of grain size distribution on flow stress, temperature and strain. *Tectonophysics* 396, 35–57. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.10.002>
- Urai, J., Schlöder, Z., Spiers, C., Kukla, P., 2008. Flow and transport properties of salt rocks. *Dynamics of complex intracontinental basins: The central European basin system* 277–290.
- Urai, J.L., Spiers, C.J., Zwart, H.J., Lister, G.S., 1986. Weakening of rock salt by water during long-term creep. *Nature* 324, 554–557. <https://doi.org/10.1038/324554a0>
- Wagner, R., 1988. Ewolucja basenu cechsztyńskiego w Polsce. *Geological Quarterly* 32, 33–52.
- Wang, G., 2003. Long-term deformation characters of salt rock surrounding a gas storage cavern. *CHINESE JOURNAL OF GEOTECHNICAL ENGINEERING-CHINESE EDITION-* 25, 431–435.
- Werner, Z., 1978. Dokumentacja geologiczna złoża soli kamiennej w kat. C1, w rejonie Zatoki Puckiej, województwo gdańskie.
- Wilkoosz, P., Burliga, S., Grzybowski, Ł., Kasprzyk, W., 2012. Comparison of internal structure and geomechanical properties in horizontally layered Zechstein rock salt. W: Bérest, P., Ghoreychi, M., Hadj-Hassen, F., Tijani, M. (Red.), *Mechanical Behaviour of Salt VII*. CRC Press, 103–110.
- Zhang, G., Li, Y., Daemen, J.J.K., Yang, C., Wu, Y., Zhang, K., Chen, Y., 2015. Geotechnical Feasibility Analysis of Compressed Air Energy Storage (CAES) in Bedded Salt Formations: a Case Study in Huai'an City, China. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 48, 2111–2127. <https://doi.org/10.1007/s00603-014-0672-z>