

WPŁYW WYSOKIEGO CIŚNIENIA I TEMPERATURY NA WARTOŚCI MODUŁU YOUNGA I WSPÓŁCZYNNIKA POISSONA W WYBRANYCH TYPACH SKAŁ

INFLUENCE OF HIGH PRESSURE AND TEMPERATURE ON YOUNG MODULUS AND POISSON RATIO VALUES FOR SELECTED ROCK TYPES

ANDRZEJ DOMONIK¹

Abstrakt. W pracy przedstawiono wpływ wysokiego ciśnienia i temperatury na zmiany wartości statycznego modułu Younga (E_{st}) i statycznego współczynnika Poissona (ν_{st}) w wybranych odmianach litologicznych skał. Wartości tych stałych materiałowych zmieniają się wraz ze wzrostem ciśnienia (P) i temperatury (T) w zależności od odmiany litologicznej. W piaskowcach występuje generalny trend – wartość modułu Younga rośnie wraz z głębokością. Podobna tendencja występuje w przypadku granitu. Na wartość modułu Younga w dolomitach zmiany ciśnienia i temperatury nie wpływają natomiast znacząco. Z kolei w anhydrytach obserwuje się bardzo duże oscylacje wartości i znaczne rozrzuty parametru w zależności od głębokości. W bazaltach na dużej głębokości (2000 m) obserwuje się zmianę trendu z rosnącego na malejącego. Natomiast dla statycznego współczynnika Poissona (ν_{st}) nie obserwuje się wyraźnych trendów. Wartości tego współczynnika nie zależą ani od głębokości, ani od temperatury.

Słowa kluczowe: moduł Younga, współczynnik Poissona, wysoka temperatura, wysokie ciśnienie, wytrzymałość, odkształcalność.

Abstract. The study presents and discusses the influence of high pressure and temperature on changes of the value of static Young modulus (E_{st}) and static Poisson ratio (ν_{st}) for selected lithological types. The values of these material constants are changing with increasing pressure and temperature in different ways depending on lithological types. For sandstones a general trend is observed – the value of Young modulus increases with depth. Similar tendency might be observed in case of granites. Changes of pressure and temperature do not affect dolomites significantly. For anhydrite high variations of Young modulus are observed depending on depth. For basalts at high depth (2000 m) increasing trend inverts into decreasing. Static Poisson ratio (ν_{st}) does not have clear trends. The values of the ratio do not depend on temperature and depth as well.

Key words: Young modulus, Poisson ratio, high temperature, high pressure, strength, strain.

WSTĘP

W geomechanicznej ocenie właściwości masywów skalnych wykorzystuje się parametryczne dane uzyskane na drodze doświadczalnej zarówno w warunkach *in situ*, jak i w laboratorium. Jedną z najważniejszych informacji jest charakterystyka wytrzymałościowo-odkształceniowa skał budujących dany masyw skalny. W warunkach powierzchniowych

wystarczającymi są dane otrzymane w badaniach prowadzonych w warunkach ciśnienia atmosferycznego i przy temperaturze pokojowej. Jednakże działalność geoinżynierska prowadzona na różnych poziomach głębokościowych górotworu wymaga stosowania odpowiednich w tych warunkach parametrów. Zmieniać się one mogą znacząco w za-

¹ Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii, Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; adomonik@uw.edu.pl

leżności od ciśnienia nakładu (P) oraz temperatury (T), czyli podstawowych znaczników zmian głębokości (Pinińska, 2007). Ustalenie zmian wartości markerów geologicznych (np. gęstości objętościowej, prędkości fali podłużnej, modułu Younga, współczynnika Poissona) w warunkach wysokiego ciśnienia i temperatury na znanych ośrodkach skalnych ma bezpośredni wpływ na rozpoznanie wglębnej budowy geologicznej oraz właściwości ośrodków skalnych na dużych głębokościach. Statyczny moduł Younga (E_{st}) oraz statyczny współczynnik Poissona (ν_{st}) to parametry często wykorzystywane przy projektowaniu geoinżynierskim zarówno w warunkach powierzchniowych (Domonik, Dziedzic, 2009), jak i na dużych głębokościach, np. na potrzeby szczelinowania hydraulicznego czy przy wykonywaniu podziemnych magazynów i składowisk. Ważne jest więc, aby

ich wartości były odpowiednio odwzorowane dla panujących w górotworze warunków ciśnieniowo-termicznych. W badaniach laboratoryjnych należy zatem dążyć do rzeczywistego odwzorowania stanu panującego w górotworze, między innymi poprzez testy przeprowadzane w warunkach wysokich ciśnień i temperatur.

W Zakładzie Geomechaniki IHiGI UW, w celu ustalenia wartości parametrów odkształcalności, uwarunkowanych zmiennym ciśnieniem i temperaturą, wykonano badania trójosiowego ściskania w komorze termociśnieniowej dla sześciu wybranych odmian skał o różnej litologii. Przyjęto 8 poziomów głębokościowych, dla których symulowano odpowiednie ciśnienie (P) i temperaturę (T). Ustalono je na podstawie średniej gęstości skał nakładu (2500 kg/m^3) oraz średniego stopnia geotermicznego ($3^\circ\text{C}/100 \text{ m}$).

REZULTATY BADAŃ

SKAŁY OSADOWE OKRUCHOWE

W **piaskowcach ciężkowickich** w warunkach naturalnych (badania jednoosiowego ściskania przy ciśnieniu atmosferycznym i temperaturze pokojowej) wartość statycznego modułu Younga (E_{st}) wynosi średnio 4,2 GPa. Jednak wraz ze wzrostem ciśnienia i temperatury wartość ta wyraźnie rośnie (fig. 1a). Znacząca zmiana pojawia się już w warunkach odpowiadających głębokości 500 m, gdzie E_{st} osiąga średnio 17 GPa, czyli cztery razy więcej niż w warunkach powierzchniowych. Wraz z dalszym zwiększaniem ciśnienia i temperatury obserwuje się sukcesywny wzrost wartości modułu, a największe wartości występują na poziomie odpowiadającym głębokości 2500 m – średnio ponad 23 GPa. Jest to niemal sześć razy więcej niż w warunkach powierzchniowych. Na kolejnych poziomach głębokościowych następuje stabilizacja, a nawet niewielka redukcja E_{st} .

Średnie wartości statycznego współczynnika Poissona (ν_{st}) wraz ze wzrostem ciśnienia i temperatury zmniejszają się sukcesywnie, od 0,4 w warunkach powierzchniowych do 0,15 w warunkach odpowiadających głębokości 3500 m. Zmiana ta ma charakter w przybliżeniu liniowy, choć rejestrowane w badaniach wartości ν_{st} charakteryzują się znacznym zróżnicowaniem.

W **piaskowcach krośnieńskich** statyczny moduł Younga (E_{st}) uzyskany w warunkach jednoosiowego ściskania osiągnął 27–29 GPa. Na symulowanej ciśnieniem i temperaturą głębokości 500 m moduł Younga osiąga wartość o ponad 5 GPa większą, a na kolejnych poziomach zmiany E_{st} mają w przybliżeniu charakter liniowy. Wzrost ciśnienia do 90 MPa i temperatury do 120°C (warunki odpowiadające głębokości 3500 m) wywołuje około 50% wzrost wartości E_{st} , do prawie 45 GPa (fig. 1b).

Stacyjny współczynnik Poissona (ν_{st}) uzyskany w zmiennych warunkach ciśnienia i temperatury osiąga wartości od 0,17 do 0,32 i zróżnicowanie takie zanotowa-

no na wszystkich kolejnych poziomach głębokości. Trudno jest zatem ustalić jednoznaczną zależność ν_{st} od modelowanej ciśnieniem oraz temperaturą głębokości. Średnie wartości ν_{st} w piaskowcach krośnieńskich oscylują w granicach 0,25, niezależnie od zmieniającego się ciśnienia i temperatury.

SKAŁY OKRUCHOWE SIARCZANOWE I WĘGLANOWE

W **anhydrytach** statyczny moduł Younga (E_{st}) w całym analizowanym przedziale ciśnienia i temperatury zawiera się od 40 do prawie 100 GPa (fig. 2a), ale trend zmian E_{st} nie jest jednoznaczny. Do głębokości 1000 m zauważa się niewielki wzrost średnich wartości E_{st} , natomiast w pozostałej części profilu głębokościowego – ich zmniejszanie. W warunkach największych ciśnień i temperatur średnia wartość E_{st} jest mniejsza od rejestrowanej w warunkach powierzchniowych o około 10 GPa.

Ogólny obraz zmian statycznego współczynnika Poissona (ν_{st}) w anhydrytach jest również bardzo niejednorodny. Wartość średnia w warunkach powierzchniowych, w przybliżeniu równa 0,25, wzrasta do 0,35 na głębokości 500 m, by poniżej oscylować w granicach 0,2–0,3. Kolejny wzrost ν_{st} obserwowany jest na największych modelowanych głębokościach i w warunkach odpowiadających 3500 m ν_{st} wynosi prawie 0,4. Na podstawie wartości średnich ν_{st} można stwierdzić, że wraz z rosnącym ciśnieniem i temperaturą statyczny współczynnik Poissona mierzony w anhydrytach nieznacznie wzrasta.

W **dołomitach** statyczny moduł Younga charakteryzuje się dużym zróżnicowaniem. W tych samych warunkach ciśnienia i temperatury różnice sięgają nawet powyżej 10 MPa. W warunkach powierzchniowych E_{st} średnio wynosi około 80 GPa, podczas gdy najwyższe wartości, stwierdzone w warunkach odpowiadających głębokości 3500 m, są więk-

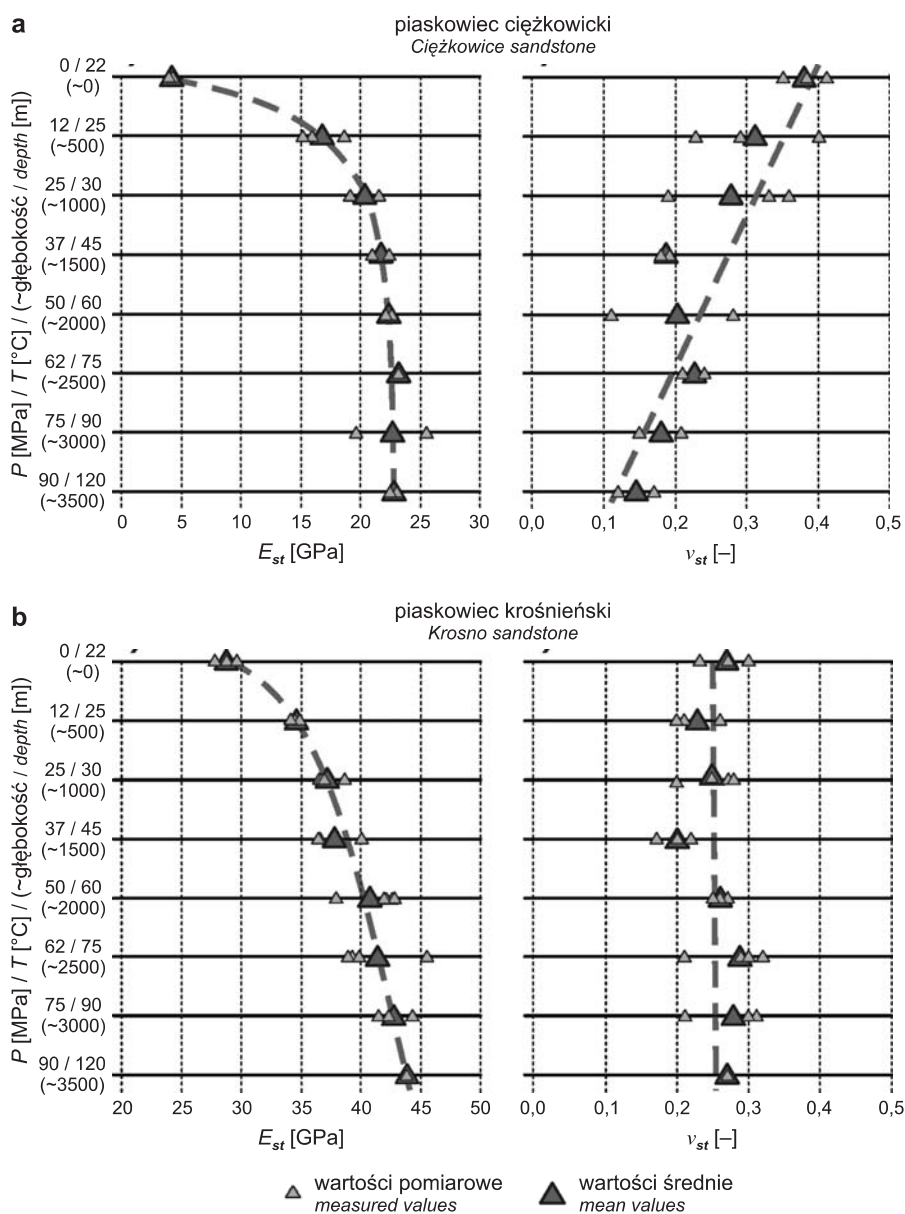


Fig. 1. Wartości statycznego modułu Younga (E_{st}) oraz statycznego współczynnika Poissona (v_{st}) w próbkach piaskowca ciężkowickiego (a) i piaskowca krośnieńskiego (b) na kolejnych poziomach ciśnienia (P) i temperatury (T)

Values of static Young modulus (E_{st}) and Poisson ratio (v_{st}) of Ciężkowice sandstone (a) and Krosno sandstone (b) samples at subsequent stages of pressure (P) and temperature (T)

szę niż 90 GPa (fig. 2b). Z pewnym przybliżeniem można też wskazać liniowy wzrost statycznego modułu Younga wraz z głębokością.

Statyczny współczynnik Poissona w dolomitach również charakteryzuje się znacznymi zmianami wartości na poszczególnych poziomach głębokościowych. Zaskakujące

jest to, że w warunkach powierzchniowych v_{st} zróżnicowany jest tylko nieznacznie i osiąga wartość w granicach 0,2. Wraz ze wzrostem ciśnienia i temperatury wartość średnia v_{st} stopniowo się zwiększa, aż do warunków odpowiadających głębokości 2000 m, gdzie średnio osiąga nieco ponad 0,3 i na tym poziomie się stabilizuje.

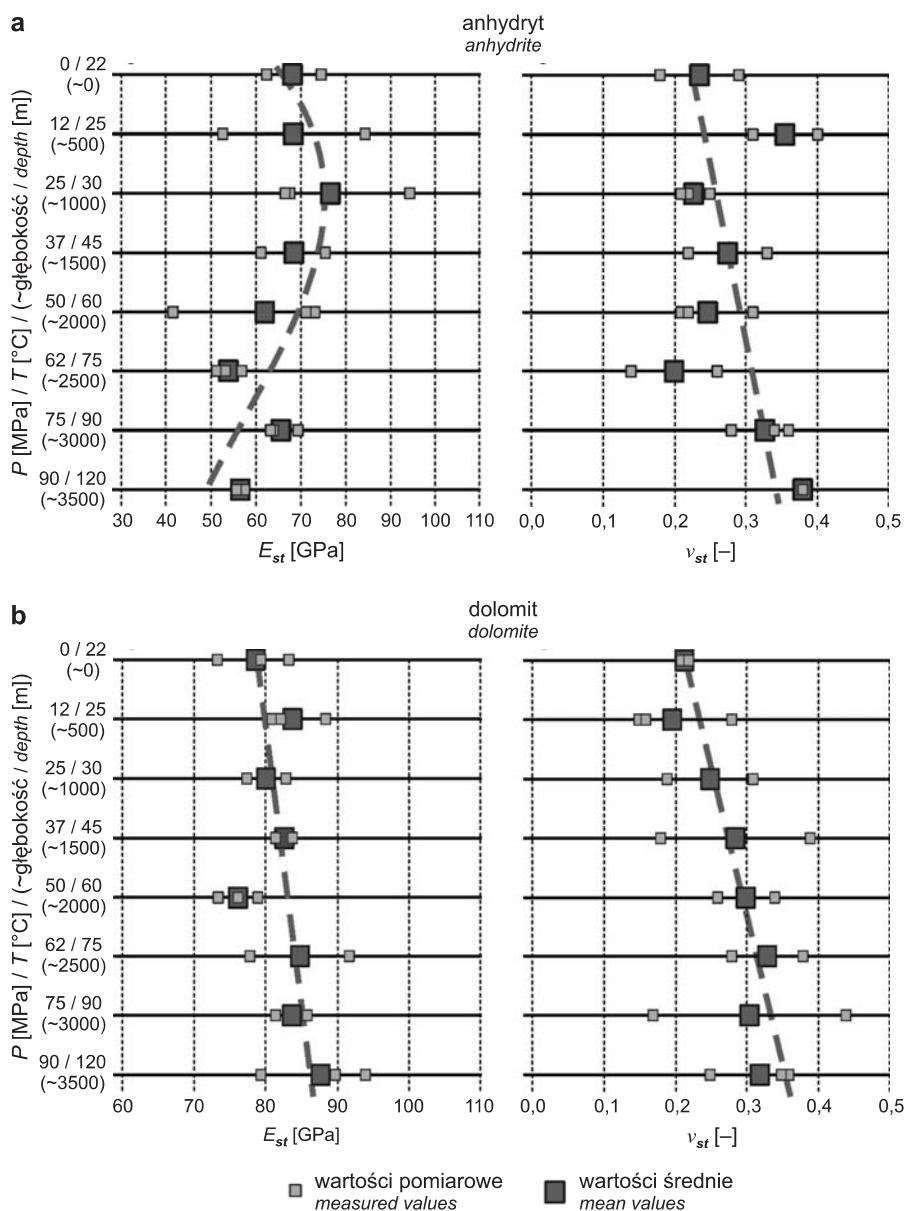


Fig. 2. Wartości statycznego modułu Younga (E_{st}) oraz statycznego współczynnika Poissona (v_{st}) w próbkach anhydrytu (a) i dolomitu (b) na kolejnych poziomach ciśnienia (P) i temperatury (T)

Values of static Young modulus (E_{st}) and Poisson ratio (v_{st}) of anhydrite (a) and dolomite (b) samples at subsequent stages of pressure (P) and temperature (T)

SKAŁY MAGMOWE

W **bazaltach** statyczny moduł Younga w różnych warunkach ciśnienia i temperatury zmienia się od prawie 60 do ponad 100 GPa (fig. 3a). Biorąc pod uwagę wartości średnie można uznać, że do głębokości ok. 2000 m E_{st} rośnie, natomiast na głębokościach większych sukcesywnie maleje. Po-

dobną tendencję obserwuje się w zmianach statycznego współczynnika Poissona. Wartości średnie v_{st} zmieniają się od 0,2 przy najmniejszych wartościach ciśnienia i temperatury do ponad 0,4 w warunkach odpowiadających głębokości 1500 m.

W **granitach** w warunkach powierzchniowych średnia wartość E_{st} wynosi ok. 65 GPa i zmniejsza się w niewielkim

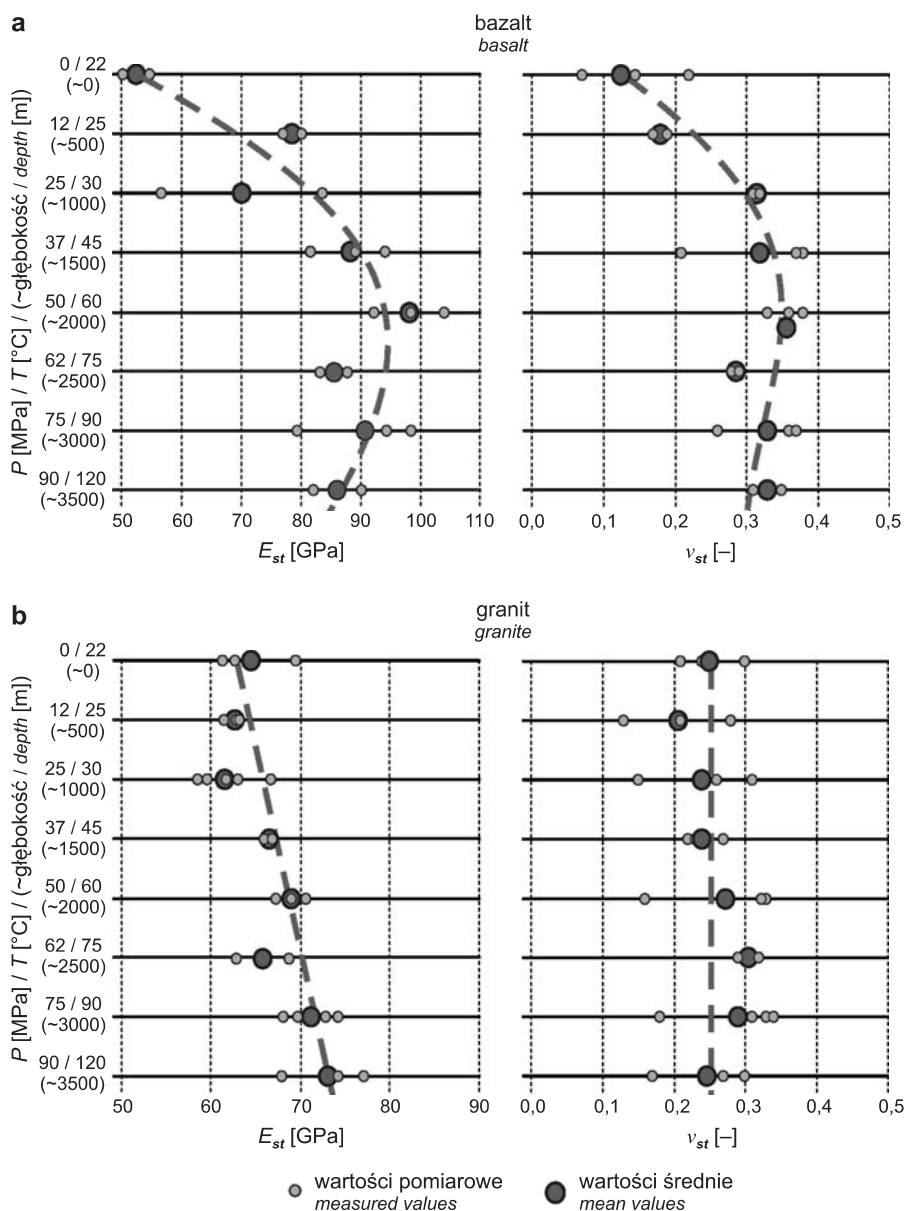


Fig. 3. Wartości statycznego modułu Younga (E_{st}) oraz statycznego współczynnika Poissona (v_{st}) w próbkach bazaltu (a) i granitu (b) na kolejnych poziomach ciśnienia (P) i temperatury (T)

Values of static Young modulus (E_{st}) and Poisson ratio (v_{st}) of basalt (a) and granite (b) samples at subsequent stages of pressure (P) and temperature (T)

zakresie do głębokości 1000 m. Od tego poziomu następuje stopniowy wzrost i największą średnią wartość, bliską 75 GPa, odnotowano w warunkach odpowiadających głębokości 3500 m (fig. 3b). Można zatem stwierdzić, że granity ze Strzelina nie zmieniają istotnie swoich parametrów odkształceniowych wraz z głębokością.

Statyczny współczynnik Poissona w granitach jest w warunkach powierzchniowych oraz na kolejnych poziomach głębokości bardzo zróżnicowany (od 0,15 do 0,35) i trudno jest wyznaczyć jednoznaczny trend zmian tego parametru.

PODSUMOWANIE

Statyczny moduł Younga (E_{st}) oraz statyczny współczynnik Poissona (ν_{st}) zmieniają się wraz ze wzrostem ciśnienia (P) i temperatury (T) w sposób zróżnicowany w zależności od odmiany litologicznej.

W piaskowcach ciężkowickich występuje wyraźny wzrost modułu Younga na pierwszych 1000 m głębokości, potem zaś wartości E_{st} stabilizują się. Relatywnie szybki wzrost E_{st} w płytszych strefach obserwuje się również w piaskowcach krośnieńskich. Poniżej 1000 m zmniejsza się dynamika wzrostu, niemniej obserwowany jest stały przyrost wartości E_{st} . Podobna tendencja występuje także w przypadku granitu, ale tylko dla ciśnień i temperatur odpowiadających głębokościom większym niż 1000 m, bowiem do tego poziomu notuje się spadek wartości E_{st} .

Zmiany ciśnienia i temperatury nie wpływają natomiast znacząco na wartości E_{st} rejestrowane w dolomitach na różnych poziomach głębokości. W anhydrytach występują z kolei bardzo duże wahania wartości E_{st} i znaczne rozrzuty tego parametru na poszczególnych poziomach głębokościowych, zwłaszcza do 1500 m, natomiast poniżej zarysowuje się niewielki trend spadkowy.

W bazaltach zauważyć można na symulowanej głębokości 2000 m zmianę trendu z rosnącego na malejący, aż do ostatecznej stabilizacji E_{st} w warunkach najwyższych ciśnień i temperatur.

Obraz zmian statycznego współczynnika Poissona (ν_{st}) wraz z głębokością jest losowy, co wskazuje na konieczność ustalania tego parametru dla szczegółowo rozpoznanych warunków lokalnych danego obiektu. Jest to tym bardziej istotne, że współczynnik Poissona jest bardzo często wykorzystywany w modelowaniu warunków wgłębnych i niepoprawny dobór wartości może skutkować błędami projektowymi.

Z przedstawionych danych wynika, że ciśnienie i temperatura wpływają na zmiany parametrów odkształcalności skał. Są one w znacznym stopniu uwarunkowane litologią materiału skalnego, zarówno w zakresie rozpiętości, jak i w dynamice. Jednak największy skokowy wzrost modułu Younga i współczynnika Poissona obserwuje się przy przejściu z warunków „powierzchniowych” do najniższych poziomów ciśnienia i temperatury.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007–2010 jako projekt rozwojowy nr R09 0038 03.

LITERATURA

DOMONIK A., DZIĘDZIC A., 2009 — Problemy interpretacyjne przy wyznaczaniu modułu sprężystości w niektórych odmianach litologicznych skał. *W: Problemy geotechniczne i środowiskowe z uwzględnieniem podłoża ekspansywnych*: 415–423. Wyd. Uczelniane UTP, Bydgoszcz.

PINIŃSKA J., 2007 — The need for pressure rock tests for a geological survey at great depths. *Arch. Min. Sci.*, **52**, 3: 281–296.

SUMMARY

The paper presents the influence of high pressure and temperature on values changes in the static Young's modulus (E_{st}) as well as the static Poisson's ratio (ν_{st}) in selected lithological types. The values of these material constants are changing differently with pressure (P) and temperature (T) rise, depending on lithological types. In case of Ciężkowice sandstone a significant growth of Young's modulus occurs all the way down to 1000 m depth. Afterwards, the values of E_{st} stabilize. Relatively rapid growth in shallower zones can be observed also in case of Krosno sandstones. The dynamics of growth decreases below 1000 m under the surface, however a stable growth of E_{st} values is still observed. A similar trend occurs also in case of granite, but only for pressures and temperatures corresponding to depths below 1000 m as down to this level the drop of E_{st} values is noted.

Changes of pressure and temperature do not affect significantly the values of E_{st} recorded in dolomites, where no clear trend is observed in depth profile. On the other hand, very large values' fluctuations as well as significant dispersion of parameter on different depth levels occur in case of

anhydrites, especially down to 1500 m below the surface. On deeper levels a slight downward trend is observed. As far as basalts are concerned, a change of trend from upward to downward is observed at a simulated depth of 2000 m below the surface until it stabilizes in conditions of the highest pressures and temperatures.

Overall image of changes of static Poisson's ratio (ν_{st}) with the change of depth is random, which indicates necessity to estimate this parameter for recognized local conditions of a given object. It is fundamental as the Poisson's ratio is very often used in case of modeling the depth conditions. Wrong selection of values may result in project errors.

The presented data indicate that pressure and temperature influence the changes of deformation characteristics of the stone. They are conditioned to a high degree by lithology of the stone material, both in span as well as in dynamics. However, the most significant growth of Young's modulus and Poisson's ratio is observed while crossing the "surface" conditions down to the lowest levels of pressure and temperature.