

Ryszard Drożdżak\*, Kazimierz Twardowski\*\*

## WPLYW EFEKTU SKALI NA WYNIKI BADAŃ PRZEPUSZCZALNOŚCI POROWATYCH OŚRODKÓW GRUNTOWO-SKALNYCH\*\*\*

### 1. WPROWADZENIE

Pod pojęciem **efektu skali** należy rozumieć zmienność właściwości materiałów (ośrodków) obserwowaną w badaniach próbek o różnych rozmiarach geometrycznie podobnych. Można tu przytoczyć definicję M.I. Kojfmana zamieszczoną w pracy [2]. Według niej efekt skali to generalna prawidłowość, a także konkretne dla różnych skał ilościowe zależności, charakteryzujące zależne od liniowych rozmiarów (powierzchni przekroju, objętości) próbek skał lub fragmentów górotworu zmiany mechanicznych właściwości rzeczywistych, zawsze w mniejszym lub większym stopniu niejednorodnych, szczelinowatych i porowatych skał ze wszystkimi towarzyszącymi im naturalnymi defektami strukturalnymi.

Grupa właściwości **mechanicznych** skał jest bardzo liczna i obejmuje wszystkie właściwości określające zachowanie się skał pod działaniem różnego rodzaju sił mechanicznych.

Właściwości mechaniczne podzielić można na dwie zasadnicze podgrupy obejmujące:

- właściwości odkształceniowe (sprężyste) i wytrzymałościowe,
- właściwości hydro- i gazodynamiczne.

Pierwsza z tych podgrup obejmuje właściwości charakteryzujące związek między naprężeniami występującymi w skałach pod działaniem sił zewnętrznych i odpowiadającymi im odkształceniom skał. Druga podgrupa obejmuje właściwości określające przepływ cieczy i gazów przez skały pod działaniem różnicy ciśnień (właściwości filtracyjne, nazywane również hydrogeologicznymi).

---

\* Doktorant Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

\*\* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH

\*\*\* Praca wykonana w ramach badań własnych Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH

## 2. SKALE BADANIA RZECZYWISTYCH OŚRODKÓW

Badając właściwości płynów i ciał stałych oraz zjawiska zachodzące w tych ciałach, współczesna nauka stosuje zwykle dwie różne skale analizy badanych obiektów:

- skalę makroskopową,
- skalę mikroskopową.

**Skala makroskopowa** stosowana jest w fizyce fenomenologicznej, a zwłaszcza w mechanice i termodynamice środowisk ciągłych. Fizyka fenomenologiczna bada związki między tak zwanymi wielkościami makroskopowymi, charakteryzującymi układy, jak temperatura, ciśnienie, energia itp., nie wdając się w mikroskopowy (atomowy lub cząsteczkowy) opis zjawisk.

**Skala mikroskopowa** wykorzystywana jest do badania podstawowych właściwości fizycznych ośrodków oraz zjawisk w nich występujących, z uwzględnieniem struktury atomowej (cząsteczkowej) tych ośrodków. Badania w skali mikroskopowej, wchodzące w zakres fizyki statystycznej i molekularnej, pozwalają wyjaśnić fizyczną istotę tych właściwości i zjawisk, które w skali makroskopowej, w fizyce fenomenologicznej, określane są jedynie na podstawie pomiarów.

Chcąc opisać strukturę fizyczną górotworu oraz określić wpływ tej struktury na jego właściwości, należy przede wszystkim w miarę dokładnie ustalić, z jakich elementów składowych (strukturalnych) zbudowany jest górotwór i jakie więzi istnieją między tymi elementami. Nie ulega wątpliwości, że określenie elementów składowych oraz rodzaju ich wzajemnych więzi zależy od przyjętej skali rozważań.

Elementy składowe górotworu i złoża oraz ich szacunkowe rozmiary przedstawione są schematycznie w tabeli 1.

Dwustopniowa skala analizy (mikroskopowa i makroskopowa), stosowana w fizyce płynów i ciał stałych, w odniesieniu do górotworu jest zdecydowanie niewystarczająca. Wynika to z ogromnie złożonego charakteru budowy górotworu oraz jego wielkich rozmiarów.

**Tabela 1**

Elementy składowe górotworu i złoża (wg [3])

Elementy składowe górotworu i złoża	Szacunkowe rozmiary, m
Atomy, jony	$(0,5-2) \cdot 10^{-10}$
Cząsteczki	$10^{-10}-10^{-9}$
Mono- i polimolekularne warstwy (grubość)	$10^{-10}-10^{-7}$
Pory wypełnione płynem	$10^{-10}-10^{-3}$
Ziarna stałego szkieletu	$10^{-9}-10^{-1}$
Przestrzenie wyługowane	$10^{-4}-10^1$
Przewarstwienia, soczewki, wtrącenia	$10^{-3}-10^1$

Z tego powodu w ostatnich latach wprowadza się kilkustopniowe skale analizy zjawisk w górotworze, w nawiązaniu do jego elementów składowych. W praktyce najczęściej przyjmuje się następujący układ skal [16]:

- ultramikroskopowa – skala atomu lub cząsteczki pierwiastków ( $10^{-10}$  m),
- mikroskopowa – skala pojedynczego ziarna mineralnego ( $10^{-6}$ – $10^{-1}$  m),
- mezoskopowa – skala próbki skały ( $10^{-2}$ – $10^0$  m),
- makroskopowa – skala złoża ( $10^{-1}$ – $10^2$  m),
- megaskopowa – skala masywu skalnego ( $10^2$ – $10^4$  m).

Badania związane z fizyką górotworu, a w szczególności z fizyką złóż prowadzone są przede wszystkim w skalach mezoskopowej i mikroskopowej.

Przy eksperymentalnym badaniu skały konieczne jest jednoczesne uwzględnianie:

- zdolności rozdzielczej wykorzystywanej do badań metody,
- rozmiarów badanej próbki skały,
- prawdopodobnych skal niejednorodności próbki.

Przy badaniu skały w laboratorium zwykle ma się do czynienia z próbkami o rozmiarach od 1 cm do 10 cm. Rozmiary obiektów wydzielanych i badanych w profilach odwiertów metodami geofizyki wiertniczej są bardzo zróżnicowane i mogą zmieniać się w granicach od kilku cm do kilkunastu, a nawet kilkudziesięciu m.

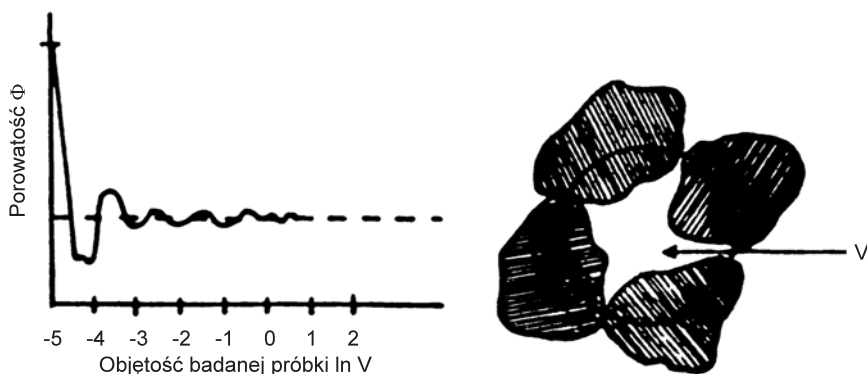
### 3. CECHY STRUKTURALNE GÓROTWORU

Za cechy strukturalne górotworu uznaje się te jego właściwości, które odzwierciedlając w przybliżeniu rzeczywistą strukturę górotworu, w istotny sposób wpływają na jego matematyczny opis. Do takich cech strukturalnych zalicza się: ciągłość, jednorodności izotropię.

Najczęściej pojęcie **ciągłości** odnosi się do rozmieszczenia masy wewnątrz obszaru zajmowanego przez dany ośrodek. Zakładając ciągłość ośrodka, przyjmuje się, że substancja całkowicie wypełnia dany obszar przestrzeni, innymi słowy, że gęstość masy w danym obszarze jest funkcją ciągłą położenia. Należy jednak pamiętać, że ciało spełniające w dużym stopniu warunek ciągłości masy nie musi jednocześnie spełniać warunku ciągłości innych właściwości fizycznych, np. właściwości wytrzymałościowych.

W ogólnym przypadku cecha ciągłości ośrodka związana jest ściśle z przyjętą skalą jego opisu. W szczególności przy **mikroskopowej skali** analizy ośrodka gruntowo-skalnego (skala pojedynczego ziarna mineralnego lub pojedynczego poru) ma on strukturę nieciągłą ziarnistą (rys. 1).

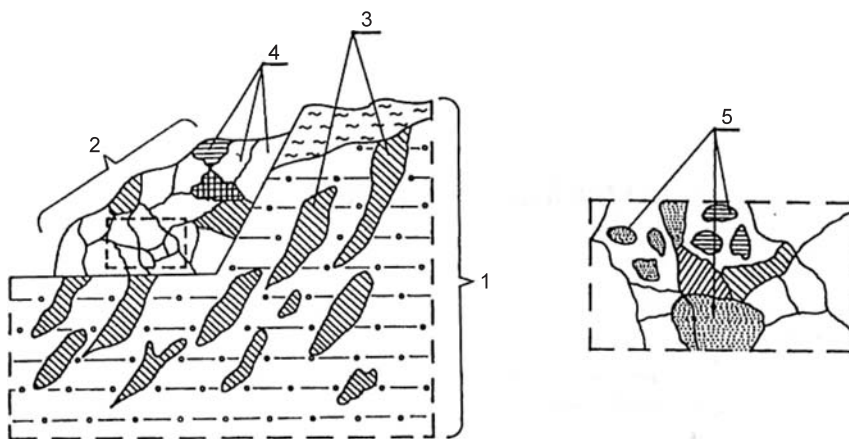
W ścisłym ujęciu matematycznym ośrodek (ciało materialne) nazywany jest **jednorodnym**, jeżeli w każdym punkcie jego właściwości fizyczne są takie same. W odniesieniu do rzeczywistych układów fizycznych, jakimi są ciała materialne, konieczne jest wprowadzenie pojęcia **jednorodności statystycznej**. Zgodnie z tym pojęciem rozważany w określonej skali ośrodek materialny jest statystycznie jednorodny, jeżeli każda jego podstawowa elementarna objętość – o rozmiarach wynikających z przyjętej skali rozważań – ma jednako-  
we właściwości fizyczne.



Rys. 1. Zależność porowatości od objętości badanej próbki [4]

Ośrodek (ciało materialne) jest **izotropowy**, gdy wartości jego właściwości fizycznych są niezależne od kierunku ich badania. Gdy ośrodek wykazuje różne wartości właściwości fizycznych w różnych kierunkach, wtedy jest on **anizotropowy**. Czasem do oceny stopnia anizotropii wprowadza się pojęcie **współczynnika anizotropii**, który jest stosunkiem wartości największej do wartości najmniejszej danej właściwości fizycznej. Dla ciał izotropowych wartość współczynnika anizotropii jest oczywiście równa jedności, dla ciał anizotropowych jest większa od jedności.

Z rozważań dotyczących ciągłości, jednorodności oraz izotropii elementów strukturalnych górotworu wynika, że cechy te mogą się istotnie różnić w zależności od przyjętej skali rozważań [9, 16] (rys. 2). Ponieważ wymienione cechy strukturalne w zasadniczy sposób określają ilościowy opis właściwości fizycznych danego obiektu, w zagadnieniach badawczych oraz w problemach technicznych ważne znaczenie ma skala. W zagadnieniach badawczych **czynnik skali** określa przede wszystkim stosunek rozmiarów badanego elementu do rozmiarów elementów strukturalnych niższego i wyższego rzędu.



Rys. 2. Elementy strukturalne górotworu: 1 – masyw skalny; 2 – skały rozluźnione (rozdrobnione); 3 – złoża skalne; 4 – kawałki skały (próbki skalne); 5 – ziarna mineralne [9]

Badając próbkę ośrodka gruntowo-skalnego (element ośrodka odpowiadający skali mezoskopowej) należy więc zawsze brać pod uwagę z jednej strony stosunek rozmiaru próbki do średnich rozmiarów ziaren mineralnych wchodzących w skład próbki (skala mikroskopowa), a z drugiej – stosunek rozmiarów próbki do rozmiarów warstwy (element ośrodka odpowiadający skali makroskopowej), której właściwości mają być oceniane na podstawie wyników badań próbki.

Sposób matematycznego opisu zjawisk fizycznych zależy od przyjętego modelu budowy materii. Przy konstruowaniu takiego modelu uwzględniany jest fakt, że w przypadku problemów technicznych praktyczną rolę odgrywają jedynie te właściwości materii, które objawiają się w skali makroskopowej.

Makroskopowe wielkości określające właściwości obiektów materialnych otrzymuje się na drodze uśrednienia ich właściwości mikroskopowych, zaś przy takim uśrednianiu wiele indywidualnych cech mikrocząsteczek tworzących materię zacierają się i nie ujawniają w skali makroskopowej.

Jeżeli rozważa się średnią wartość pewnej właściwości ośrodka (np. jego porowatości), to zmieniając wielkość przedziału uśredniania otrzymuje się niejednakowe wyniki; w ten sposób przejawia się efekt skali (patrz rys. 1). Przy stosunkowo dużych przedziałach uśredniania, wskutek niejednorodności przestrzennej w skali makroskopowej, wartość średnia podlega dużym wahaniom. Podobnie jest w przypadku przedziałów dostatecznie małych, kiedy to wahania ich średnich są wynikiem niejednorodności przestrzennej w skali mikroskopowej. W wielu przypadkach wartość średnia pozostaje stała w dość szerokim przedziale skali mezoskopowej (pośredniej), wyraźnie rozdzielającym przedziały skal: makroskopowej i mikroskopowej.

Z uwagi na złożoną i nieuporządkowaną strukturę ośrodka porowatego opis procesów fizycznych w nim zachodzących jest zagadnieniem trudnym. Aby taki opis uprościć, można wykorzystać możliwość zastąpienia ośrodka porowatego makroskopowo **ekwiwalentnym ośrodkiem ciągłym**. Taką możliwość zapewniają metody **teorii homogenizacji** (uśrednienia przestrzennego), wykorzystywane w praktycznym rozwiązywaniu zagadnień technicznych (np. [23]). Metody te pozwalają na przejście drogą teoretyczną od lokalnego opisu ośrodka porowatego w **skali mikroskopowej** (najmniejszej) do jego opisu w **skali mezoskopowej** (pośredniej). Konieczność takiego przejścia jest konsekwencją faktu, iż skala mikroskopowa, z powodzeniem wykorzystywana przy opisie ośrodków jednofazowych (ciągłych) jest za mała i zbyt szczegółowa, aby być użyteczną w przypadku ośrodków wielofazowych<sup>1</sup>.

Cechą charakterystyczną metod homogenizacji jest to, iż mezoskopowe właściwości ośrodka porowatego określone są przy pomocy **wielkości średnich**.

Skuteczna homogenizacja ośrodka porowatego jest możliwa, jeżeli spełnione są warunki rozdzielczości i periodyczności skal [20].

**Warunek rozdzielczości skal** sprowadza się do relacji

$$d \leq l \ll L \quad (1)$$

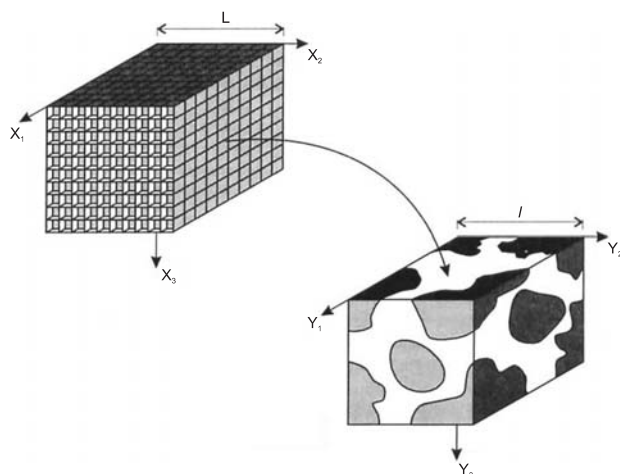
---

<sup>1</sup> Fazami nazywamy części ośrodka porowatego, różniące się właściwościami fizycznymi (np. gęstością masy) i oddzielone powierzchniami nieciągłości tych właściwości.

gdzie  $d$ ,  $l$  oraz  $L$  oznaczają wymiary charakterystyczne ośrodka homogenizowanego odpowiednio w mikroskali, mezoskali oraz makroskali. Przyjmuje się, że proces homogenizacji jest już możliwy, gdy  $l/L < 1/10$ .

**Warunek periodyczności skal** zakłada, że badana w skali mezoskopowej objętość ośrodka powinna zawierać odpowiednio dużą liczbę tzw. **reprezentatywnych obszarów elementarnych** – powtarzalnych elementów przestrzennych charakteryzujących się odpowiednią strukturą wewnętrzną (rys. 3). Nazywane są one czasem w literaturze fenomenologicznymi cząstkami materialnymi lub mezodomenami (np. [23]), w literaturze anglojęzycznej określane jako REV (ang. *representative elementary volume*).

W efekcie procesu homogenizacji ośrodka porowatego zarówno w odniesieniu do jego geometrii, jak i do procesów fizycznych w nim zachodzących, uzyskujemy jego pełny opis w skali mezo, tj. poprzez relacje między wielkościami uśrednionymi odnoszającymi się do ośrodka ciągłego.



**Rys. 3.** Wizualizacja ośrodka periodycznego [20]: REV – reprezentatywna elementarna objętość ośrodka: zmienne wymiarowe  $X$  i  $Y$ , pierwsza określa położenie punktów względem założonego w skali makro układu odniesienia, natomiast druga określa współrzędne tych punktów w lokalnym układzie odniesienia

#### 4. CZYNNIKI OBJAŚNIAJĄCE OBSERWOWANĄ ZMIENNOŚĆ WYNIKÓW BADAŃ GÓROTWORU

Uzyskiwane z pomiarów wartości badanych właściwości fizycznych ośrodków gruntowo-skalnych zależne są od szeregu czynników, których działanie jest niejednokrotnie złożone, niekiedy prowadzące do przeciwnych skutków. Czynniki te są w szczególności [6, 16]:

- charakter litologiczny;
- niejednorodność i anizotropia ośrodka;
- jego stan fizyczny;
- niepewności i błędy pomiarowe.



Oczywiste jest, że o właściwościach fizycznych gruntów i skał w znacznej mierze decyduje ich skład mineralogiczny, w tym rodzaj i zawartości minerałów ilastych, uziarnienie, zawartość substancji organicznej.

Znaczenie niejednorodności i anizotropii badanych ośrodków w nawiązaniu do skał oraz ich badania zostały omówione powyżej – patrz podrozdział 2 i 3.

Jednym z czynników decydujących o porównywalności uzyskiwanych wyników badań laboratoryjnych dotyczących różnych próbek górotworu jest ich stan fizyczny. Pobrana do badań próbka może być: sucha, powietrzno-sucha bądź nasycona wodą (w granicznym wypadku – w pełni nasycona). Stąd wyniki prowadzonych badań będą się różnić i muszą być odnoszone do określonego jednoznacznie stanu fizycznego próbki. Właściwości fizyczne gruntów i skał generalnie istotnie zależą od nasycenia wodą ich przestrzeni porowej (wilgotności).

W odniesieniu do gruntu w warunkach naturalnych zmianom stanu fizycznego podlegają najpłytsze jego strefy, które okresowo mogą różnić się nasyceniem wodą (odpowiednio strefy saturacji – podciągania lub wzniosu kapilarnego – aeracji). Takie stany gruntu można traktować jako odpowiedniki właściwych stanów fizycznych jego próbek: próbka nasycona – strefa saturacji gruntu; próbka powietrzno-sucha – strefa aeracji.

W przypadku głęboko zalegających warstw skalnych istotny wpływ na wyniki pomiarów mają również naturalne warunki termobaryczne skał, tj. temperatura i ciśnienie.

Istotnym elementem związanym z charakterystyką właściwości fizycznych gruntów jest sposób prezentacji uzyskiwanych wyników pomiarów. Jak wiadomo, podstawowym postulatem metrologii jest końcowy wynik pomiaru przedstawiający wartość mierzonej wielkości  $x$  w formie oceny przedziałowej [13]:

$$a \leq x \leq b \quad (2)$$

przy czym szerokość przedziału  $b - a = 2\epsilon > 0$  związana jest z tzw. progiem czułości metody pomiarowej, czego zasadniczą przyczyną jest niedoskonałość naszych zmysłów i narzędzi stosowanych w procesie pomiaru (np. [10, 13]).

Źródłem niepewności i błędów pomiarowych mogą być czynniki, które można usystematyzować w zależności od:

- miejsca powstawania (np. metodyczne, aparaturowe);
- charakteru zmian (systematyczne, losowe);
- charakteru pomiaru (statyczne, dynamiczne);
- wartości rejestrowanego pomiaru (addytywne, multiplikatywne).

Generalnie udział poszczególnych czynników w końcowej obserwowanej zmienności wyników pomiarów laboratoryjnych i otworowych jest zróżnicowany i warunkowany jednoczesnym działaniem wielu elementarnych przyczyn. Dokładne ich ustalenie w ogólnej obserwowanej zmienności jest trudne, a także żmudne do zrealizowania i wymaga dysponowania niezależnymi wielokrotnymi wynikami pomiarów.

Efekty wpływu niepewności i błędów pomiarowych na charakterystyki szacowanych właściwości fizycznych można w przybliżeniu pośrednio ustalić, wykorzystując analizę wariancji jednej zmiennej [15].

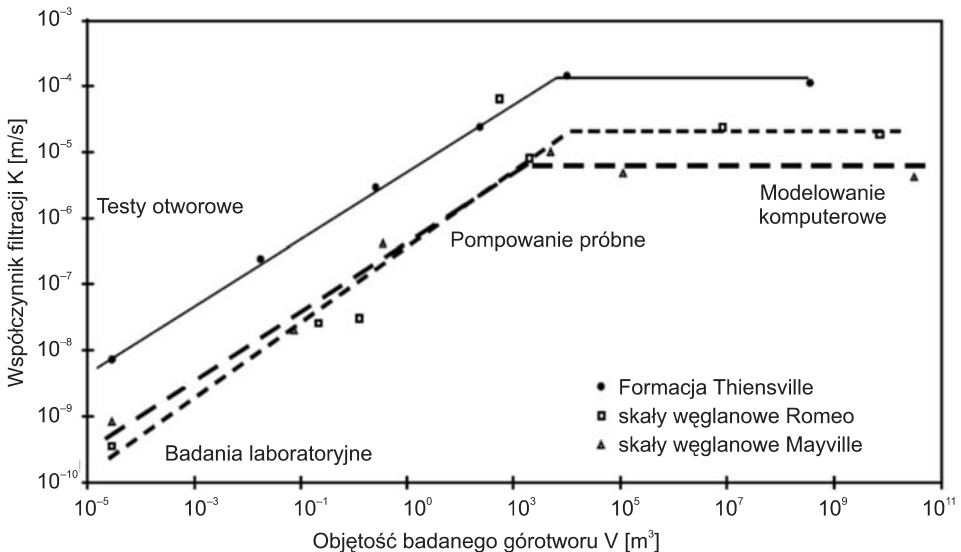
## 5. EFEKT SKALI A WYNIKI BADAŃ PRZEPUSZCZALNOŚCI GÓROTWORU

Przepuszczalność jest kluczowym parametrem opisującym procesy filtracji płynów, w tym w szczególności wody, w górotworze. Zdolność przepływu wody w ośrodku porowatym, w szczególności gruntowym, w stanie jego pełnego nasycenia wodą (strefa saturacji), jest przeważnie określana mianem przepuszczalności; dokładniej wodoprzepuszczalności lub filtracji. Ilościowo wyrażają to odnośne parametry petrofizyczne ośrodka nazywane współczynnikami. W przypadku gruntu nienasyconego (strefy wzniosu kapilarnego i aeracji) przepływ wody charakteryzowany jest zwykle współczynnikiem przewodności hydraulicznej [6, 22]; w odniesieniu do trójfazowych ośrodków porowatych skalnych – współczynnikiem przepuszczalności fazowej dla wody [3, 7].

Przepuszczalność jest parametrem trudnym do poprawnej ilościowej oceny głównie z powodu przestrzennej niejednorodności i anizotropii górotworu. Fakt ten jest ogólnie znany, jednakże temat wpływu efektu skali pomiaru na wynik końcowy jest często pomijany przez wielu badaczy. Natomiast liczne badania dowodzą, że otrzymywane wartości przepuszczalności mierzone w różnych warunkach i skalach – od skali laboratoryjnej aż do regionalnej różnią się znacznie [5, 17, 18].

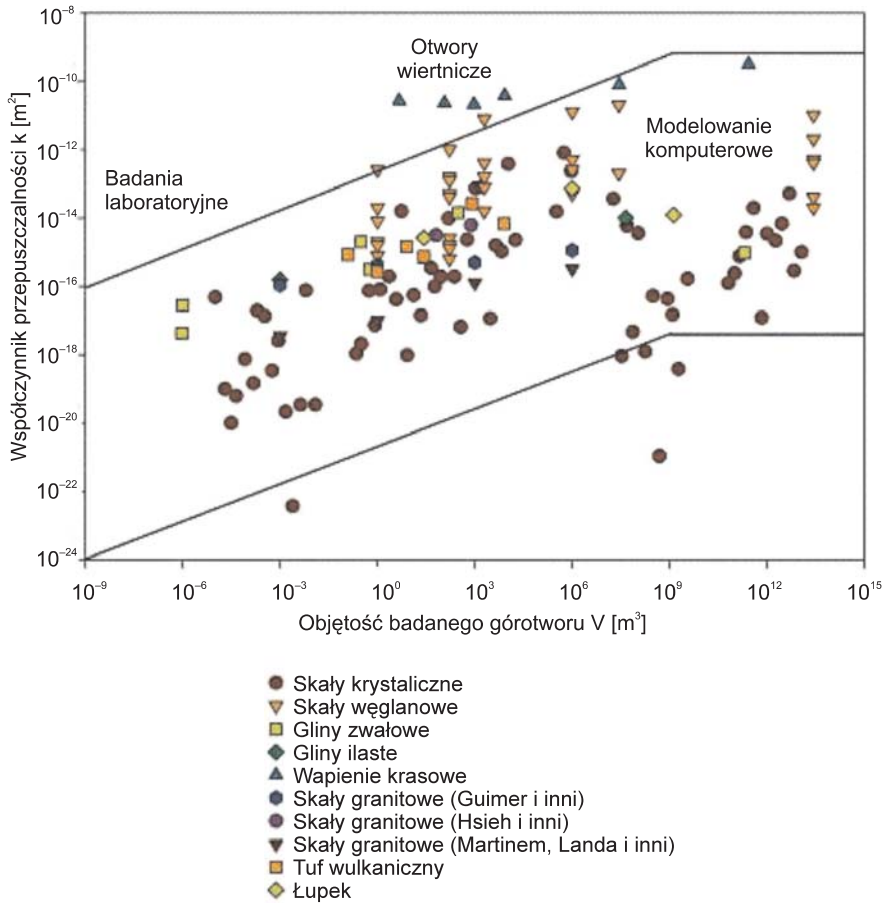
Uzyskiwane wyniki wykazują generalny wzrost wartości przepuszczalności, w szczególności wodoprzepuszczalności, wraz ze wzrostem skali pomiaru, aż do ustabilizowania się wartości (rys. 4, 5, 7, 8). Obserwowane znaczne rozproszenie wyników jest związane głównie właśnie z efektem skali.

Istotną rolę odgrywa również zróżnicowanie wyników badań, czasem bardzo duże, warunkowane czynnikami techniczno-metodycznymi, również w odniesieniu do określonej skali pomiarów [4, 6, 12].



Rys. 4. Zależność współczynnika filtracji badanych skał serii węglanowej z wykorzystaniem różnych metod od objętości badanego elementu górotworu [na podstawie 17]





**Rys. 5.** Zależność współczynnika przepuszczalności skał i gruntów określanego według różnych metod od objętości badanego elementu górotworu [na podstawie 5]

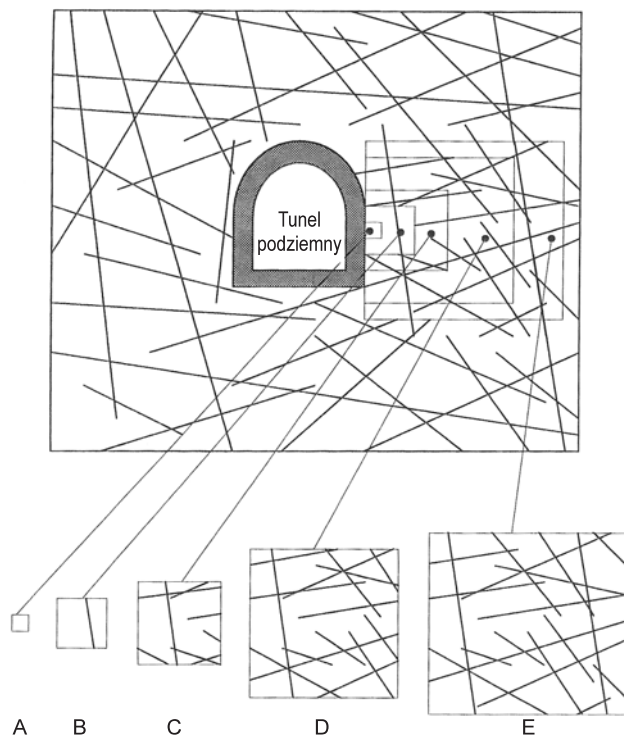
Efekt skali bardzo dobrze obrazują rysunki 6 i 7, które przedstawiają kolejne skale pomiarowe przy badaniach przepuszczalności górotworu.

Analizując szczegółowo rysunek 6, można zauważyć, że wraz ze wzrostem domen od A do E, wzrasta mierzona całkowita przepuszczalność, która jest sumą przepuszczalności skały nienaruszonej oraz nakładających się na siebie nieciągłości (szczelin) ośrodka porowatego.

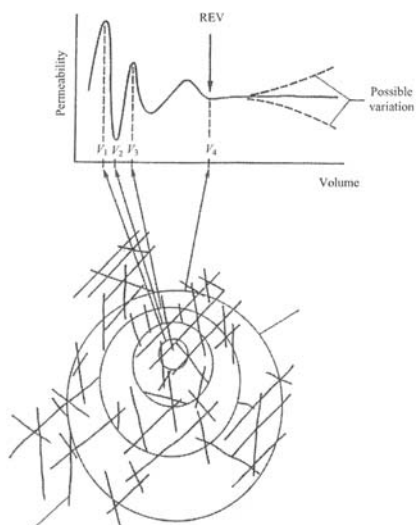
Z powyższych rozważań, dotyczących cech strukturalnych górotworu wynika, że mogą się one istotnie różnić w zależności od przyjętej skali rozważań [16, 20, 21].

Liczne badania pokazują generalnie trend wzrostowy wartości przepuszczalności, poczynając od badań laboratoryjnych, a na skali regionalnej badań kończąc, przy znacznym rozproszeniu wyników spowodowanym dużym zróżnicowaniem badanego ośrodka.

W ostatnich latach wielu badaczy próbowało określić przyczyny oraz wpływ efektu skali na końcowe wyniki oceny przepuszczalności ośrodków gruntowo-skalnych [1, 5, 12, 14].



Rys. 6. Uproszczony schemat prezentujący występowanie różnych skal pomiaru w odniesieniu do badań przepuszczalności górotworu [25]



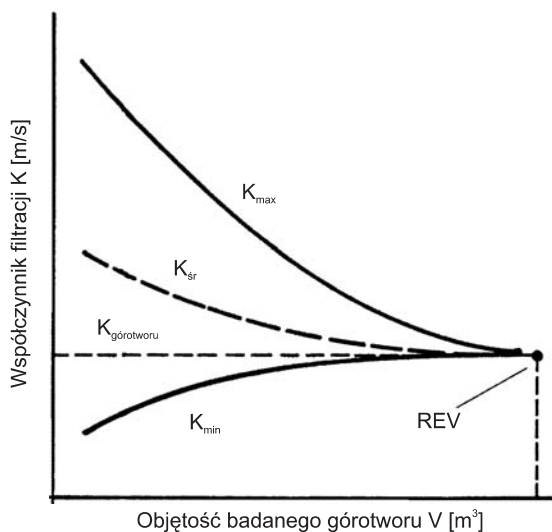
Rys. 7. Reprezentatywna elementarna objętość (REV) obrazująca przepuszczalność górotworu [25]

Wyniki tych prac różnią się znacznie. Część autorów skłania się ku pogładowi, że efekt skali pomiarowej jest wynikiem braku dokładnych danych o badanych warstwach lub przyjętych metodach badawczych (pojęcie artefaktu) [1]. Natomiast inni autorzy skłaniają się ku pogładowi, że efekt skali możemy tłumaczyć błędem wynikającym z nakładania się niedokładności powstających na całym etapie pomiarów: pobierania, przygotowywania próbek oraz przeprowadzenia pomiarów wraz należyłą interpretacją uzyskiwanych danych.

Niemniej jednak takie uogólnione podejście wydaje się niewłaściwe, dlatego też większość autorów tłumaczy to zjawisko w odmienny sposób [1, 12, 14, 15].

Zasadniczy wpływ na wyniki badań ma silnie niejednorodny i anizotropowy charakter badanego ośrodka, który ujawnia się w skali laboratoryjnej, natomiast mniej widoczny jest w badaniach polowych, np. pompowaniach próbnych czy też symulacjach komputerowych. Oddziaływanie to uwidacznia się zwłaszcza przy silnie uwarstwionych ośrodkach, czego rezultatem jest wielomodalny rozkład porowatości, a co za tym idzie przepuszczalności [1].

Końcowy wynik testów laboratoryjnych jest zależny od niedostosowania wielkości badanej próbki w stosunku do objętości reprezentatywnej REV, powyżej której można oczekiwać dużej zgodności statystycznej wyników (mały rozrzut) (rys. 7).



Rys. 8. Wpływ efektu skali na wyniki badań współczynnika filtracji górotworu [12]

## 6. PODSUMOWANIE

Przedstawione powyżej kwestie nie obejmują wszystkich zagadnień związanych z właściwą oceną przepuszczalności, w szczególności wodoprzepuszczalności w odniesieniu do ośrodków gruntowo-skalnych.

Uzyskiwane wyniki w przeprowadzonych badaniach pokazują generalny wzrost wartości wodoprzepuszczalności, poczynając od skali pomiaru laboratoryjnego, poprzez polo-

we badania w piezometrach oraz próbne pompowania, a skończywszy na modelowaniu komputerowym, które zazwyczaj daje najwyższe wartości, często zawyżone. Tak znaczne rozproszenie wyników jest związane głównie z efektem skali.

Aby dokładniej wyjaśnić zjawisko wpływu skali na uzyskiwane wyniki badań przepuszczalności, należałoby [3, 9]:

- zdefiniować zależności opisujące zmienność uzyskiwanych wartości średnich oraz ich rozrzut w zależności od objętości próbki;
- określić wielkość objętości reprezentatywnej REV dla danego modelu ośrodka porowatego;
- ocenić zależność pomiędzy wynikami badań laboratoryjnych oraz polowych w celu ewentualnego określenia sposobów ich wzajemnego przeliczania.

## LITERATURA

- [1] Chapuis R.P., Dallaire V., Marcotte D. i inni: *Evaluating the hydraulic conductivity at three different scales within an unconfined sand aquifer At Lachenaie, Quebec*, "Canadian Geotechnical Journal", 2005, 42.
- [2] Čirkov S.J.: *Vlijanic masštabnogo faktora na pročnost uglej*, Izd. „Nauka”, Moskwa 1969.
- [3] Dobrynin V.M., Vendelštejn B.J., Koževnikov D.A.: *Petrofizyka*, Izd. „Nedra”, Moskwa 1991.
- [4] Heinemann Z.: *Hydrodynamik in porösen Medien*, Skriptum Montanuniversität, Leoben 1984.
- [5] Illman A.W.: *Strong field evidence of directional permeability scale effect in fractured rock*, "Journal of Hydrology", 2006, 319.
- [6] Kaczyński R., Drągowski E., Krogulec E., Laskowski K. i in.: *Współczynnik filtracji gruntów spoistych wyznaczony różnymi metodami*, Mat. Semin.: „Aktualne problemy geologiczno-inżynierskich badań podłoża budowlanego i zagospodarowania terenu”, Bogucki Wyd. Nauk. S. C., Poznań 2000.
- [7] Liszka K., Rychlicki S., Twardowski K.: *Wybrane zagadnienia z fizyki i eksploatacji złóż ropy i gazu oraz pomiarów otworowych*, praca na zlecenie PPIEZRiG „Petrobaltic”, WWN AGH, Kraków 1994 (niepublikowane).
- [8] Łydźba D.: *Homogenisation theories applied to porous media mechanics*, "Journal of theoretical and applied mechanics", 1998, 36.
- [9] Majcherczyk T.: *Zarys fizyki skał i gruntów budowlanych*, Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej, Kraków 2000.
- [10] Marcyniuk A.: *Podstawy miernictwa elektrycznego dla kierunku elektronika*, Wyd. Polit. Śl., Gliwice 2002.
- [11] *Metody badań gruntów spoistych*, red. nauk. B. Grabowska-Olszewska, Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa 1980.
- [12] Pinto da Cunha A. (ed.): *Scale effects in rock masses 93*, A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield 1993.
- [13] Piotrowski J.: *Podstawy miernictwa*, Wyd. Nauk.-Techn., Warszawa 2002.

- [14] Rovey W.C.: *Digital simulation of the scale effect in hydraulic conductivity*, "Hydrogeology Journal", 1998, 6.
- [15] Rychlicki S., Twardowski K.: *Application of the variance analysis to an evaluation of the physico-chemical brown coal properties*, *Archiwum Górnictwa PAN*, vol. 35, is. 4, 1990.
- [16] Ryncarz T.: *Zarys fizyki górotworu*, Śl. Wyd. Techn., Katowice 1993.
- [17] Schulze-Makuch D., Cherkauer D.S.: *Variations in hydraulic conductivity with scale of measurement during aquifer tests in heterogenous, porous carbonate rocks*, "Hydrogeology Journal", 1996, 183.
- [18] Sánchez-Vila X., Carrera J., Girardi J.P.: *Scale effects in transmissivity*, "Journal of Hydrology", 2006, 319.
- [19] Sobczyk M.: *Statystyka*, Wyd. Nauk. PWN, Warszawa 1997.
- [20] Strzelecki T. (red.): *Mechanika ośrodków niejednorodnych. Teoria homogenizacji*, Dolnośl. Wyd. Eduk., Wrocław 1996.
- [21] Twardowski K., Traple J., Fafara Z., Krochmal K.: *Analiza możliwości pośredniej oceny parametrów termicznych górotworu karbońskiego Górnośląskiego Zagłębia Węglowego w oparciu o standardowe dane geofizyki wiertniczej*, w: Plewa S. (red.), *Rozpoznanie pola cieplnego Ziemi w obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego dla potrzeb górnictwa i ciepłownictwa*, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków 2001.
- [22] *Właściwości gruntów nienasyconych* (pr. zbior. pod red. B. Grabowskiej-Olszewskiej), Wyd. Nauk. PWN, Warszawa 1998.
- [23] Wyrwał J.: *Termodynamiczne podstawy fizyki budowli*, Wyd. Polit. Opol., Opole 2004.
- [24] Vogel H.J., Roth K.: *Moving through scales of flow and transport in soil*, "Journal of Hydrology", 2003, 272.
- [25] Zhang L.: *Engineering properties of rocks*, ELSEVIER, Inc. Amsterdam, Boston, Heidelberg, London, New York, Oxford, Paris, San Diego, Singapore, Sydney, Tokyo 2005.