

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

Wydział Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa  
i Automatyki Przemysłowej

PRACA DOKTORSKA

MATEUSZ MASŁOWSKI

**Wpływ wgniatania ziaren materiału podsadzkowego  
w skałę złożową na efektywność podsadzenia  
szczeliny w zabiegach stymulacyjnych wybranych  
złóż niekonwencjonalnych**

Dyscyplina naukowa:

Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka

Promotor: prof. dr hab. inż. Małgorzata Labus

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Piotr Kasza, prof. INiG-PIB

Gliwice, 2022

## **Podziękowania**

*Składam serdeczne podziękowania wszystkim, dzięki którym realizacja pracy doktorskiej była możliwa.*

*Szczególnie dziękuję Pani Promotor, prof. Małgorzacie Labus, za opiekę naukową, przekazaną wiedzę, zaangażowanie oraz niezliczony czas poświęcony na dyskusję, które zaowocowały niniejszą rozprawą. Jestem niezmiernie wdzięczny za okazaną życzliwość, wiarę, cierpliwość i wyrozumiałość.*

*Serdecznie dziękuję Promotorowi pomocniczemu, prof. Piotrowi Kaszy, za pomoc merytoryczną i szczerą opinię, które pozwoliły mi na osiągnięcie zamierzonych celów.*

*Wyrazy wdzięczności kieruję również do Pani Dyrektor, prof. Marii Ciechanowskiej, za życzliwość i wsparcie w realizacji celów.*

*Dziękuję wszystkim Pracownikom INiG-PIB, jak również Koleżankom i Kolegom z pracy, z którymi miałem przyjemność współpracować, za życzliwość, przekazaną wiedzę i pomoc na różnych etapach realizacji niniejszej pracy.*

*Dziękuję moim Rodzicom za nieocenioną pomoc w realizacji życiowych celów, bez których nie osiągnąłbym tego wszystkiego, co teraz mam.*

*Pracę dedykuję moim wspomniałym Rodzicom.*

*Mateusz Masłowski*

## Streszczenie

Celem naukowym pracy było zbadanie wpływu zjawiska wgniatania ziaren materiału podsadzkowego w skałę złożową na efektywne podsadzenie wytworzonej szczeliny, po wykonanym zabiegu hydraulicznego szczelinowania złóż niekonwencjonalnych. Wyznaczenie głębokości wgnieceń ziaren propantu w skałę złożową oraz uszkodzenia powierzchni wytworzonej ściany szczeliny pozwoliło na ocenę efektywnego podsadzenia szczeliny propantem, w zależności od podatności skały na zjawisko embedmentu.

Do badań wybrano próbki skał złożowych, pochodzących z dwóch formacji niekonwencjonalnych złóż węglowodorów. Były to: piaskowiec permski z basenu czerwonego spągowca, stanowiący skałę zbiornikową typu „*tight gas*”, oraz sylurski łupek iłowcowo-bitumiczny z obszaru basenu bałtyckiego, typu „*gas shale*”. Na podstawie zgromadzonych danych geologiczno-złożowych oraz wyznaczonych właściwości geomechanicznych skał dobrano odpowiednie parametry płynu szczelinującego i podsadzki.

Laboratoryjne symulacje zjawiska embedmentu przeprowadzono dla obu skał zarówno w postaci suchej, jak i nasyconej płynem szczelinującym. W badaniach uwzględniono warunki złożowe zbliżone do warunków panujących w wybranych formacjach (tj. temperaturę i naprężenie ściskające), oraz różną koncentrację powierzchniową materiału podsadzkowego.

Uszkodzone powierzchnie rdzeni obserwowano metodą mikroskopową i na tej podstawie wyznaczono parametry charakteryzujące zjawisko embedmentu, z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego. Wykonane badania pozwoliły na określenie wpływu niekorzystnego zjawiska embedmentu na efektywność podsadzenia szczeliny dla dwóch wybranych krajowych złóż niekonwencjonalnych. Za najważniejsze parametry uznano efektywną rozwartość szczeliny oraz z efektywną powierzchnię kontaktu ściany szczeliny z warstwą podsadzki. Za bardzo istotny wskaźnik uznano również wielkość wycisku materiału skalnego na powierzchni skały.

Dodatkowo przeprowadzono teoretyczne obliczenia wielkości rozwartości szczeliny wypełnionej podsadzką przy wybranych czterech różnych wartościach jej koncentracji powierzchniowej. Zaproponowano także schemat klasyfikacji efektywności podsadzenia szczeliny na podstawie odpornością skały na zjawisko embedmentu.

Wykonane analizy pozwalają na dokładniejsze zrozumienie wpływu niekorzystnego zjawiska embedmentu z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego, na wstępną ocenę efektywności podsadzenia szczeliny propantem dla zaproponowanej technologii zabiegu stymulacyjnego.

W wyniku pracy uszczegółowiono metodykę analizy i interpretacji uzyskanych wyników oraz dokonano wyboru metod statystycznych mających na celu oszacowanie niepewności mierzonych i wyliczonych wartości.

## **Abstract**

The scientific aim of the work was to investigate the effect of the phenomenon of indenting the proppant grains into the formation rock on the effective propped of the created fracture, after the hydraulic fracturing of the unconventional deposits. Determining the depth of the indentations of the proppant grains into the rock deposit and damage to the fracture wall surface allowed for the assessment of the proppant backing of the fracture, depending on the susceptibility of the rock to the phenomenon of embedment.

The samples of the rocks from two unconventional formations of hydrocarbons were selected for the tests: Rotliegende Permian sandstone representing a reservoir rock of the "tight gas" type, and Silurian clay-bituminous shale from the Baltic Basin, the "gas shale" type. On the basis of the collected geological and deposit data and the determined geomechanical properties of the rocks, appropriate parameters of the fracturing fluid and the proppant material were selected.

Laboratory simulations of the phenomenon of embedment were carried out for two rock types, both dry and saturated with fracturing fluid. The research took into account the deposit conditions similar to the conditions of selected formations (i.e. temperature and compressive stress), as well as different surface concentration of the proppant material.

The damaged faces of the cores were observed using the microscopic method and on this basis, the parameters characterizing the phenomenon of embedment were determined, including an impression of the rock material. The results of the experiments allowed to determine the impact of the unfavorable phenomenon of embedment on the effectiveness of propping the fracture for two selected unconventional deposits of Poland. The most important parameters were the effective width of the fracture and the effective contact surface of the fracture face with the proppant layer. The amount of the impressions of the rock material on the rock surface was also considered as a very important indicator.

Additionally, theoretical calculations of the width of the fracture filled with the proppant were carried out for the four selected surface concentration. A scheme for classifying the effectiveness of the fracture's filling, on the basis of the rock resistance to the phenomenon of embedment, was also proposed.

The performed analyzes allow for a more detailed understanding of the impact of the unfavorable phenomenon of embedment, taking into account the impression of the rock material, on the initial assessment of the effectiveness of the fracture's propped, for the proposed stimulation treatment technology.

As a result of the work, the methodology of the analysis and interpretation of the obtained results was developed, and statistical methods were selected to estimate the uncertainty of the measured and calculated values.



## Spis treści

<b>Spis treści</b> .....	<b>I</b>
<b>Spis rysunków</b> .....	<b>III</b>
<b>Spis tabel</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Indeks stosowanych akronimów</b> .....	<b>XI</b>
<b>Spis symboli i jednostek</b> .....	<b>XII</b>
<b>1. Cel i teza pracy</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Wprowadzenie</b> .....	<b>2</b>
2.1. Studium warunków geologiczno-złożowych i właściwości skał złożowych niekonwencjonalnych złóż węglowodorów w Polsce .....	4
2.1.1. <i>Budowa geologiczna oraz obszary występowania złóż niekonwencjonalnych</i> ..5	
2.1.2. <i>Właściwości petrograficzne wybranych skał złożowych</i> .....	16
2.1.3. <i>Właściwości petrofizyczne wybranych skał złożowych</i> .....	17
2.1.4. <i>Warunki złożowe w wybranych formacjach złożowych</i> .....	20
2.2. Przegląd zagadnień związanych z metodą intensyfikacji wydobywania węglowodorów ze złóż niekonwencjonalnych .....	22
2.2.1. <i>Charakterystyka zabiegu hydraulicznego szczelinowania</i> .....	22
2.2.2. <i>Rodzaje płynów szczelinujących</i> .....	28
2.2.3. <i>Rodzaje materiałów podsadzkowych</i> .....	30
2.2.4. <i>Zjawiska negatywnie wpływające na efektywność podsadzenia szczeliny</i> ...	32
2.3. Przegląd zagadnień związanych z analizą zjawiska wgniatania ziaren materiału podsadzkowego w skałę złożową oraz jego wpływ na efektywność podsadzenia szczeliny .....	34
2.3.1. <i>Charakterystyka zjawiska embedmentu</i> .....	35
2.3.2. <i>Wpływ zjawiska embedmentu na efektywność podsadzenia szczeliny</i> .....	37
2.3.3. <i>Doświadczenia światowe i krajowe</i> .....	38
<b>3. Metodyka badań</b> .....	<b>53</b>
3.1. Określenie warunków badań .....	53
3.2. Przygotowanie próbek skał do badań .....	55
3.3. Oznaczenie składu mineralnego skał .....	55
3.4. Wyznaczenie właściwości petrofizycznych skał .....	55
3.5. Charakterystyka technologii wykonania zabiegu stymulacji wydobywania .....	60

3.6. Przygotowanie płynu szczelinującego .....	61
3.7. Przygotowanie materiału podsadzkowego .....	62
3.8. Nasycanie próbek skały w płynie szczelinującym .....	63
3.9. Laboratoryjna symulacja zjawiska wgniatania ziaren podsadzki w skałę złożową oraz warunki jej wykonania .....	64
3.10. Obrazowanie powierzchni ścian szczeliny .....	66
3.11. Metodyka wyznaczenia chropowatości powierzchni ściany szczeliny .....	68
3.12. Metodyka wyznaczenia wielkości charakteryzujących zjawisko embedmentu ...	69
3.13. Metodyka analizy otrzymanych wyników badań pod kątem efektywności podsadzenia szczeliny w zabiegach intensyfikacyjnych .....	73
3.14. Sposób wykonania obrazowania powierzchni skały wraz z analizą .....	75
<b>4. Laboratoryjna symulacja zjawiska embedmentu .....</b>	<b>78</b>
4.1. Opis petrograficzny wytypowanych skał .....	79
4.2. Wybrane właściwości petrofizyczne wytypowanych skał .....	82
4.3. Wstępne wytypowanie technologii hydraulicznego szczelinowania dla badanych złóż niekonwencjonalnych .....	83
4.4. Płyny szczelinujące użyte do badań .....	84
4.5. Materiał podsadzkowy użyty do badań .....	85
4.6. Testy zjawiska embedmentu .....	86
4.7. Wielkości charakteryzujące zjawisko embedmentu i wycisku materiału skalnego dla szczeliny wypełnionej podsadzką w różnych wytypowanych skałach złożowych .....	102
4.8. Analiza morfologii powierzchni skał .....	104
<b>5. Analiza wpływu zjawiska embedmentu na efektywność podsadzenia szczeliny .....</b>	<b>113</b>
<b>6. Statystyczna ocena uzyskanych wyników .....</b>	<b>124</b>
<b>7. Dyskusja wyników .....</b>	<b>132</b>
<b>8. Podsumowanie i wnioski .....</b>	<b>138</b>
<b>Literatura .....</b>	<b>141</b>
<b>Akty prawne i normatywne .....</b>	<b>150</b>
<b>Załącznik</b>	

## Spis rysunków

Rys. 2.1	Trójkąt zasobów gazu ziemnego .....	5
Rys. 2.2	Jednostki geologiczne Polski z zaznaczonym kolorem szarym strefami potencjalnego występowania gazu ziemnego .....	6
Rys. 2.3	Pozycja stratygraficzna i obszary występowania najważniejszych formacji potencjalnie zbiornikowych dla węglowodorów w Polsce pod kątem możliwości powstawania w nich gazu zamkniętego .....	7
Rys. 2.4	Przestrzenny rozkład głównych systemów depozycyjnych górnego czerwonego spągowca w polskiej części basenu dolno-permskiego .....	7
Rys. 2.5	Występowanie najbardziej perspektywicznych, krajowych złóż gazu zamkniętego w piaskowcach .....	8
Rys. 2.6	Lokalizacja dolnopaleozoicznych basenów sedymentacyjnych oraz obszarów występowania łupków górnego ordowiku i dolnego syluru .....	11
Rys. 2.7	Pozycja stratygraficzna i obszary występowania najważniejszych formacji iłowcowo-mułowcowych o podwyższonej zawartości substancji organicznej w Polsce .....	11
Rys. 2.8	Uproszczony profil litostratygraficzny dolnego paleozoiku w (A) regionie lubelskim oraz (B) basenie bałtyckim wraz z pozycją łupków wzbogaconych w substancję organiczną i potencjalnie zawierających gaz ziemny i/lub ropę naftową w łupkach .....	13
Rys. 2.9	Pozycja głównych formacji iłowcowych w profilu stratygraficznym dolnego paleozoiku na zachodnim skłonie kratonu wschodnioeuropejskiego .....	14
Rys. 2.10	Schemat przestrzeni porowej niekonwencjonalnej skały piaskowcowej typu zamkniętego ( <i>tight gas</i> ) .....	17
Rys. 2.11	Schemat przestrzeni porowej niekonwencjonalnej skały ilasto-mułowcowej ( <i>gas shale</i> ) .....	19
Rys. 2.12	Uproszczony schemat powstawania szczelin i spękań w złożach niekonwencjonalnych .....	23
Rys. 2.13	Uproszczony schemat przepływu węglowodorów ze złoża do odwiertu, po wykonanym zabiegu hydraulicznego szczelinowania .....	24
Rys. 2.14	Schemat doboru technologii szczelinowania, w zależności od wskaźnika kruchości, z ang. <i>Brittleness</i> .....	25
Rys. 2.15	Schemat doboru technologii szczelinowania, w zależności od właściwości mechanicznych skały łupkowej .....	25
Rys. 2.16	Schemat: a) stopnia skomplikowania szczelin; b) teoretycznej koncepcji tworzenia struktury szczelin, powstałych po zabiegu hydraulicznego szczelinowania złóż węglowodorów .....	27
Rys. 2.17	Geometria szczelin tworzonych w formacjach skalnych o: a) małej oraz b) dużej zdolności do szczelinowania (pęknięcia) .....	28
Rys. 2.18	Graficzne przedstawienie klasyfikacji zastosowania materiałów podsadzkowych, z uwzględnieniem naprężeń ściskających oraz temperatury .....	31

Rys. 2.19	Niekorzystne zjawiska występujące w szczelinie, w trakcie oraz po zakończeniu zabiegu hydraulicznego szczelinowania złoża węglowodorów, gdzie $\sigma_{ef}$ – naprężenie efektywne .....	33
Rys. 2.20	Wpływ zjawiska embedmentu na wielkość przepływu węglowodorów w skale, w obrębie ściany szczeliny .....	35
Rys. 2.21	Geometryczny model uszkodzenia powierzchni ściany szczeliny przez ziarno podsadzki, gdzie: $d_0$ – średnica ziarna podsadzki, $s$ – promień obszaru kontaktu ziarna podsadzki ze skałą .....	35
Rys. 2.22	Dokładniejszy model geometryczny zjawiska wgniatania ziarna podsadzki w ściany szczeliny .....	36
Rys. 2.23	Wpływ zjawiska embedmentu na wielkość dostępnej powierzchni ściany szczeliny dla przepływu węglowodorów .....	37
Rys. 2.24	Wpływ zjawiska wgniatania wielu ziaren podsadzki w ściany szczeliny na wielkość rozwartości szczeliny .....	38
Rys. 3.1	Urządzenie AVS-700 firmy VINCI Technologies, w INiG-PIB .....	57
Rys. 3.2	Schemat nasycania skały w płynie szczelinującym .....	63
Rys. 3.3	Stanowisko do nasycania skały w płynie zabiegowym, zaprojektowane i wykonane w INiG-PIB .....	63
Rys. 3.4	Schemat stanowiska badawczo-pomiarowego do laboratoryjnej symulacji zjawiska wgniatania ziaren podsadzki w ścianę szczeliny .....	64
Rys. 3.5	Stanowisko do symulacji zjawiska wgniatania ziaren podsadzki w ściany szczeliny (Embedment), w INiG-PIB .....	64
Rys. 3.6	Mikroskop optyczny HMR-300 3D Profiler firmy Huvitz, w INiG-PIB .....	66
Rys. 3.7	Schemat rozmieszczenia obrazowanych i analizowanych mniejszych obszarów na powierzchniach czołowych rdzeni .....	67
Rys. 3.8	Mikroskop elektronowy Quanta 650 FEG firmy FEI, w Instytucie Czystych Technologii w Ostrawie .....	67
Rys. 3.9	Analiza profilu chropowatości powierzchni (objaśnienia symboli – w tekście) .....	68
Rys. 3.10	Analiza profilu powierzchni uszkodzonej przez ziarna podsadzki (objaśnienia symboli – w tekście) .....	70
Rys. 3.11	Obraz pierwotnej powierzchni czołowej górnego rdzenia w obszarze 1 (test4), wraz z wyznaczeniem jednego z odcinków pomiarowych profilu .....	75
Rys. 3.12	Analiza odcinka pomiarowego profilu w obszarze w celu wyznaczenia chropowatości pierwotnej powierzchni czołowej górnego rdzenia w obszarze 1 (test 4) .....	76
Rys. 3.13	Obraz powierzchni czołowej górnego rdzenia w obszarze 1 (test 4) .....	76
Rys. 3.14	Obraz powierzchni czołowej górnego rdzenia w obszarze 1 (test 4), wraz z wyznaczeniem jednego z odcinków pomiarowych profilu .....	76
Rys. 3.15	Analiza odcinka pomiarowego profilu w celu wyznaczenia wielkości charakteryzujących zjawisko embedmentu i wycisku materiału skalnego dla górnego rdzenia w obszarze 1 (test 4) .....	77
Rys. 4.1	Próbki wybranych skał: a) piaskowiec, b) łupek .....	79

Rys. 4.2	Obraz powierzchni piaskowca przed eksperymentami. a, b – pow. 200x, c – pow. 800x, d – pow. 1600x. ....	80
Rys. 4.3	Obraz powierzchni łupka przed eksperymentami. a – pow. 300x, b – pow. 200x, c – pow. 1600x, d – pow. 1556x .....	81
Rys. 4.4	Dobór cieczy zabiegowej w zależności od kruchości skały. Wskaźnik BRITT z pomiarów ultradźwiękowych dla badanych skał .....	83
Rys. 4.5	Płyn szczelinujący 1 z dodatkiem łamacza : a) po sieciowaniu w 22 °C, b) po 24 godz. wygrzewania w 127 °C i schłodzeniu do 22 °C .....	84
Rys. 4.6	Płyn szczelinujący 2 z dodatkiem łamacza : a) po sieciowaniu w 23 °C, b) po 24 godz. wygrzewania w 96 °C i schłodzeniu do 23 °C .....	84
Rys. 4.7	Podsadzka ceramiczna ISP 20/40, użyta do badań .....	85
Rys. 4.8	Suche rdzenie, przed testem 1 .....	87
Rys. 4.9	Powierzchnie czołowe suchych rdzeni wraz z wytypowanymi do analiz obszarami, pod mikroskopem (obiektyw 5x), przed testem 1 .....	87
Rys. 4.10	Rdzenie, po teście 1 .....	88
Rys. 4.11	Powierzchnie czołowe suchych rdzeni wraz z wytypowanymi do analiz obszarami, pod mikroskopem (obiektyw 5x, polaryzator), po teście 1 .....	88
Rys. 4.12	Suche rdzenie, przed testem 2 .....	91
Rys. 4.13	Powierzchnie czołowe suchych rdzeni wraz z wytypowanymi do analiz obszarami, pod mikroskopem (obiektyw 5x), przed testem 2 .....	91
Rys. 4.14	Powierzchnie czołowe rdzeni nasyconych płynem szczelinującym 1, przed testem 2 .....	92
Rys. 4.15	Rdzenie, po teście 2 .....	92
Rys. 4.16	Powierzchnie czołowe rdzeni wraz z wytypowanymi do analiz obszarami, pod mikroskopem (obiektyw 5x, polaryzator), po teście 2 .....	92
Rys. 4.17	Suche rdzenie, przed testem 3 .....	95
Rys. 4.18	Powierzchnie czołowe suchych rdzeni wraz z wytypowanymi do analiz obszarami, pod mikroskopem (obiektyw 5x), przed testem 3 .....	95
Rys. 4.19	Rdzenie, po teście 3 .....	96
Rys. 4.20	Powierzchnie czołowe suchych rdzeni wraz z wytypowanymi do analiz obszarami, pod mikroskopem (obiektyw 5x, polaryzator), po teście 3 .....	96
Rys. 4.21	Suche rdzenie, przed testem 4 .....	99
Rys. 4.22	Powierzchnie czołowe suchych rdzeni wraz z wytypowanymi do analiz obszarami, pod mikroskopem (obiektyw 5x), przed testem 4 .....	99
Rys. 4.23	Powierzchnie czołowe rdzeni nasyconych płynem szczelinującym 2, przed testem 4 .....	100
Rys. 4.24	Rdzenie, po teście 4 .....	100
Rys. 4.25	Powierzchnie czołowe rdzeni wraz z wytypowanymi do analiz obszarami, pod mikroskopem (obiektyw 5x, polaryzator), po teście 4 .....	100
Rys. 4.26	Obraz powierzchni górnego rdzenia piaskowca po teście 1, z zaznaczonymi miejscami wcisku ziarn podsadzki w skałę. a – pow. 200x, b – pow. 400x. Objaśnienia: Fe – tlenki żelaza, Q – kwarc .....	105
Rys. 4.27	Obraz powierzchni dolnego rdzenia piaskowca po teście 1, z zaznaczonymi miejscami wcisku ziarn podsadzki w skałę. a, b – pow. 200x .....	106

Rys. 4.28	Obraz powierzchni górnego rdzenia piaskowca po teście 2, z zaznaczonymi miejscami wcisku ziarn podsadzki w skałę. a, b – pow. 180x .....	106
Rys. 4.29	Obraz powierzchni dolnego rdzenia piaskowca po teście 2, z zaznaczonymi miejscami wcisku ziarn podsadzki w skałę. a – pow. 180x, b – pow. 200x ...	107
Rys. 4.30	Obraz powierzchni górnego rdzenia łupka po teście 3, z zaznaczonymi miejscami wgnieceń. a, b – pow. 200x .....	108
Rys. 4.31	Szkic przedstawiający mechanizm tworzenia się łusek, podczas wgniatania ziaren podsadzki w powierzchnię suchej skały łupkowej .....	108
Rys. 4.32	Obraz fragmentu powierzchni skały łupkowej po teście 3, pod mikroskopem (pow. 800x) .....	109
Rys. 4.33	Obraz powierzchni dolnego rdzenia łupka po teście 3, z zaznaczonymi miejscami wgnieceń. a – pow. 200x, b – pow. 800x .....	109
Rys. 4.34	Obraz powierzchni górnego rdzenia łupka po teście 4. a – pow. 26x, b – pow. 130x .....	110
Rys. 4.35	Szkic przedstawiający mechanizm tworzenia się łusek, podczas wgniatania ziaren podsadzki w powierzchnię skały łupkowej nasyconej płynem .....	110
Rys. 4.36	Obraz powierzchni górnego rdzenia łupka po teście 4. a – pow. 130x, b – pow. 500x. Objasnienia w tekście .....	111
Rys. 4.37	Obraz powierzchni dolnego rdzenia łupka po teście 4. a – pow. 130x, b – pow. 200x .....	112
Rys. 5.1	Zestawienie parametrów wpływających na podsadzenie szczeliny propanem, umożliwiającej przepływ węglowodorów do odwiertu dla dwóch różnych skał złożowych .....	115
Rys. 5.2	Zestawienie parametrów wpływających na podsadzenie szczeliny propanem, umożliwiającej przepływ węglowodorów ze skały do szczeliny dla dwóch różnych skał złożowych .....	116
Rys. 5.3	Maksymalna możliwa do uzyskania rozwartość szczeliny bez zjawiska embedmentu i wycisku dla różnych koncentracji powierzchniowych podsadzki ceramicznej ISP 20/40 w 127 °C, przy 86,5 MPa .....	117
Rys. 5.4	Efektywna rozwartość szczeliny z podsadzką ceramiczną ISP 20/40 o różnej jej koncentracji powierzchniowej z uwzględnieniem zjawiska embedmentu wraz z wyciskiem materiału skalnego, dla piaskowca w 127 °C, przy 86,5 MPa ...	118
Rys. 5.5	Procentowa efektywna rozwartość szczeliny z podsadzką ceramiczną ISP 20/40 o różnej jej koncentracji powierzchniowej z uwzględnieniem zjawiska embedmentu wraz z wyciskiem materiału skalnego, dla piaskowca w 127 °C, przy 86,5 MPa .....	118
Rys. 5.6	Maksymalna możliwa do uzyskania rozwartość szczeliny bez zjawiska embedmentu i wycisku dla różnych koncentracji powierzchniowych podsadzki ceramicznej w 96 °C, przy 65,5 MPa .....	119
Rys. 5.7	Efektywna rozwartość szczeliny z podsadzką ceramiczną ISP 20/40 o różnej jej koncentracji powierzchniowej z uwzględnieniem zjawiska embedmentu wraz z wyciskiem materiału skalnego, dla łupka w 96 °C, przy 65,5 MPa ...	120

Rys. 5.8	Procentowa efektywna rozwartość szczeliny z podsadzką ceramiczną ISP 20/40 o różnej jej koncentracji powierzchniowej z uwzględnieniem zjawiska embedmentu wraz z wyciskiem materiału skalnego, dla łupka w 96 °C, przy 65,5 MPa .....	120
Rys. 5.9	Efektywność podsadzenia ściany szczeliny propanem ceramicznym ISP 20/40 o różnej jego koncentracji powierzchniowej z uwzględnieniem zjawiska embedmentu wraz z wyciskiem materiału skalnego, dla: piaskowca (w 127 °C, przy 86,5 MPa) oraz łupka (w 96 °C, przy 65,5 MPa) .....	122

## Spis tabel

Tab. 2.1	Zestawienie przykładowych wyników badań i analiz rozwartości szczeliny dla różnych skał i technologii hydraulicznego szczelinowania .....	46
Tab. 2.2	Zestawienie przykładowych wyników badań i analiz uszkodzenia powierzchni ściany szczeliny dla różnych skał i technologii hydraulicznego szczelinowania .....	49
Tab. 4.1	Warunki geologiczno-złożowe dla wytypowanych złóż niekonwencjonalnych .....	78
Tab. 4.2	Dynamiczne parametry sprężyste dla wybranych skał .....	82
Tab. 4.3	Kruchość wybranych skał. (YM_BRIT – kruchość z modułu Young’a, PR_BRIT – kruchość ze współczynnika Poisson’a, BRIT – kruchość średnia).....	83
Tab. 4.4	Wybrane podstawowe właściwości podsadzki ceramicznej ISP 20/40, dla granulacji znormalizowanej (0,850 ÷ 0,425 mm) – Analiza sitowa .....	85
Tab. 4.5	Wybrane podstawowe właściwości podsadzki ceramicznej ISP 20/40, dla granulacji znormalizowanej (0,850 ÷ 0,425 mm) – Wytrzymałość podsadzki .....	86
Tab. 4.6	Zestawienie danych użytych do analizy chropowatości powierzchni ścian szczeliny dla piaskowca, przed testem 1 .....	88
Tab. 4.7	Wyniki chropowatości powierzchni ścian szczeliny dla piaskowca, przed testem 1 .....	88
Tab. 4.8	Zestawienie danych użytych do analizy zjawiska wgniatania ziaren podsadzki w powierzchnie ścian szczeliny z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego dla piaskowca, po teście 1 .....	89
Tab. 4.9	Wyniki badań i analiz wgniatania ziaren podsadzki w powierzchnię ścian szczeliny dla piaskowca, po teście 1 .....	89
Tab. 4.10	Średnie wartości głębokości wgniecenia ziarna podsadzki i wysokości wycisku materiału skalnego oraz ich szerokości dla suchej skały piaskowcowej, po teście 1 .....	89
Tab. 4.11	Zestawienie danych użytych do analizy chropowatości powierzchni ścian szczeliny dla piaskowca, przed testem 2 .....	91
Tab. 4.12	Wyniki chropowatości powierzchni ścian szczeliny dla piaskowca, przed testem 2 .....	92
Tab. 4.13	Zestawienie danych użytych do analizy zjawiska wgniatania ziaren podsadzki w powierzchnie ścian szczeliny z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego dla piaskowca, po teście 2 .....	93
Tab. 4.14	Wyniki badań i analiz wgniatania ziaren podsadzki w powierzchnię ścian szczeliny dla piaskowca, po teście 2 .....	93
Tab. 4.15	Średnie wartości głębokości wgniecenia ziarna podsadzki i wysokości wycisku materiału skalnego oraz ich szerokości dla skały piaskowcowej nasyconej płynem szczelinującym 1, po teście 2 .....	93
Tab. 4.16	Zestawienie danych użytych do analizy chropowatości powierzchni ścian szczeliny dla łupka, przed testem 3 .....	96



Tab. 4.17 Wyniki chropowatości powierzchni ścian szczeliny dla łupka, przed testem 3 .....	96
Tab. 4.18 Zestawienie danych użytych do analizy zjawiska wgniatania ziaren podsadzki w powierzchni ścian szczeliny z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego dla łupka, po teście 3 .....	97
Tab. 4.19 Wyniki badań i analiz wgniatania ziaren podsadzki w powierzchnię ścian szczeliny dla łupka, po teście 3 .....	97
Tab. 4.20 Średnie wartości głębokości wgniecenia ziarna podsadzki i wysokości wycisku materiału skalnego oraz ich szerokości dla suchej skały łupkowej, po teście 3 .....	97
Tab. 4.21 Zestawienie danych użytych do analizy chropowatości powierzchni ścian szczeliny dla łupka, przed testem 4 .....	99
Tab. 4.22 Wyniki chropowatości powierzchni ścian szczeliny dla łupka, przed testem 4 .....	100
Tab. 4.23 Zestawienie danych użytych do analizy zjawiska wgniatania ziaren podsadzki w powierzchni ścian szczeliny z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego dla łupka, po teście 4 .....	101
Tab. 4.24 Wyniki badań i analiz wgniatania ziaren podsadzki w powierzchnię ścian szczeliny dla łupka, po teście 4 .....	101
Tab. 4.25 Średnie wartości głębokości wgniecenia ziarna podsadzki i wysokości wycisku materiału skalnego oraz ich szerokości dla skały łupkowej nasyconej płynem szczelinującym 2, po teście 4 .....	101
Tab. 4.26 Wielkości charakteryzujące zjawisko embedmentu i wycisk materiału skalnego w szczelinie wypełnionej podsadzką w suchej i nasyconej płynem szczelinującym skały piaskowcowej, po teście 1 i 2 .....	103
Tab. 4.27 Wielkości charakteryzujące zjawisko embedmentu i wycisk materiału skalnego w szczelinie wypełnionej podsadzką w suchej i nasyconej płynem szczelinującym skały łupkowej, po teście 3 i 4 .....	104
Tab. 5.1 Efektywność podsadzenia szczeliny przez ziarna podsadzki dla suchej i nasyconej płynem szczelinującym skały piaskowcowej ( $T=127,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $P_{ef} = 86,5\text{ MPa}$ ) .....	113
Tab. 5.2 Efektywność podsadzenia szczeliny przez ziarna podsadzki dla suchej i nasyconej płynem szczelinującym skały łupkowej ( $T=96,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $P_{ef} = 65,5\text{ MPa}$ ) .....	114
Tab. 5.3 Schemat klasyfikacji efektywności podsadzenia szczeliny, związanej z odpornością skały i podsadzki na zjawisko embedmentu .....	121
Tab. 6.1 Wyniki testu równości średnich dla pomiarów chropowatości w zakresie głębokości wgłębień i wysokości wzniesień dla suchej skały piaskowcowej, w teście 1 .....	127
Tab. 6.2 Wyniki testu równości średnich dla pomiarów chropowatości w zakresie głębokości wgłębień i wysokości wzniesień dla suchej skały piaskowcowej, w teście 2 .....	127

Tab. 6.3	Wyniki testu równości średnich dla pomiarów embedmentu w zakresie głębokości wgnieceń i wysokości wycisków oraz szerokości wgnieceń i wycisków dla suchej skały piaskowcowej, w teście 1 .....	128
Tab. 6.4	Wyniki testu równości średnich dla pomiarów embedmentu w zakresie głębokości wgnieceń i wysokości wycisków oraz szerokości wgnieceń i wycisków dla skały piaskowcowej nasyconej płynem szczelinującym, w teście 2 .....	128
Tab. 6.5	Wyniki testu równości średnich dla pomiarów chropowatości w zakresie głębokości wgłębień i wysokości wzniesień dla suchej skały łupkowej, w teście 3 .....	129
Tab. 6.6	Wyniki testu równości średnich dla pomiarów chropowatości w zakresie głębokości wgłębień i wysokości wzniesień dla suchej skały łupkowej, w teście 4 .....	129
Tab. 6.7	Wyniki testu równości średnich dla pomiarów embedmentu w zakresie głębokości wgnieceń i wysokości wycisków oraz szerokości wgnieceń i wycisków dla suchej skały łupkowej, w teście 3 .....	130
Tab. 6.8	Wyniki testu równości średnich dla pomiarów embedmentu w zakresie głębokości wgnieceń i wysokości wycisków oraz szerokości wgnieceń i wycisków dla skały łupkowej nasyconej płynem szczelinującym, w teście 4 .....	130

## Indeks stosowanych akronimów

- BCGS (ang. *Basin Centered Gas System*) – system złóż w centrum basenów sedymentacyjnych
- TOC (ang. *Total Organic Carbon*) – całkowity węgiel organiczny
- BGŚ – karboński basen górnośląski
- HPG – hydroksypropyloguar
- CMHPG – karboksymetylo hydroksypropylo guar oraz pochodne celulozy
- HEC – hydroksyetyloceluloza i CMHEC
- RCS (ang. *Resin Coated Sand*) – piasek kwarcowy pokryty żywicą
- ULCP (ang. *Ultra Light Ceramic Proppants*) – ultralekka podsadzka ceramiczna
- LCP (ang. *Light Ceramic Proppants*) – lekka podsadzka ceramiczna
- ISP (ang. *Inter Strenght Proppants*) – podsadzka ceramiczna o średniej wytrzymałości
- HSP (ang. *Hight Strenght Proppants*) – podsadzka o wysokiej wytrzymałości – tlenek cyrkonu, spieki boksytowe
- RCCP (ang. *Resin Coated Ceramic Proppants*) – podsadzka ceramiczna pokryta żywicą
- LVDT (ang. *Linear Variable Differential Transformer*) – elektroniczny szczelinościomierz, (transformatorowy czujnik przemieszczeń liniowych o układzie różnicowym)
- FEG (ang. *field emission gun*) – polowy emiter elektronów
- EBSA – analizator dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych
- BSE – detektor elektronów wstecznie rozproszonych
- BRITT (ang. *Brittleness*) – wskaźnik kruchości skały

## Spis symboli i jednostek

$\sigma$	–	naprężenie ściskające szczelinę (pochodzące od górotworu), <i>MPa</i>
$\sigma_h$	–	minimalne naprężenie poziome, <i>MPa</i>
$\sigma_H$	–	maksymalne naprężenie poziome, <i>MPa</i>
$\sigma_V$	–	naprężenie pionowe (pochodzące od nadkładu), <i>MPa</i>
$F_{CD}$	–	bezwymiarowa przewodność szczeliny, <i>wartość bezwymiarowa</i>
$k_f$	–	przepuszczalność szczeliny, <i>m<sup>2</sup></i>
$W_f$	–	rozwartość szczeliny, <i>mm</i>
$k$	–	przepuszczalność skały, <i>m<sup>2</sup></i>
$H_f$	–	wysokość szczeliny, <i>m</i>
$L_f$	–	długości głównej szczeliny, <i>m</i>
$x_f$	–	połowa długości głównej szczeliny $L_f$ , <i>m</i>
$w_f$	–	rozwartość dodatkowo powstałych spękań (szczelin), <i>mm</i>
$l_f$	–	długość dodatkowo powstałych szczelin (spękań), <i>m</i>
$\sigma_{ef}$	–	naprężenie efektywne, <i>MPa</i>
$d_0$	–	średnica ziarna podsadzki, <i>mm</i>
$s$	–	promień obszaru kontaktu ziarna podsadzki ze skałą, <i>mm</i>
$d_{zp}$	–	średnica ziarna podsadzki, <i>mm</i>
$d_{pk}$	–	średnica obszaru kontaktu podsadzki ze skałą, <i>mm</i>
$T$	–	temperatura złożowa, <i>°C</i>
<i>grad.geot</i>	–	gradient geotermiczny odpowiadający badanemu obszarowi występowania badanej formacji złożowej, w <i>°C/m</i>
$H_z$	–	głębokość zalegania formacji złożowej, <i>m</i>
$P_{ef}$	–	efektywne ciśnienie ściskające szczelinę i podsadzkę, <i>MPa</i>
$P_z$	–	ciśnienie zamknięcia szczeliny, <i>MPa</i>
<i>grad.zamk</i>	–	gradient naprężenia zamknięcia szczeliny (odpowiadający badanemu obszarowi formacji złożowej), <i>MPa/m</i>
$\mu_g$	–	lepkość dynamiczna gazu, <i>Ns/m<sup>2</sup></i>
$t_g$	–	temperatura przepływającego gazu, <i>°K</i>
$l$	–	długość rdzenia, <i>m</i>
$V_n$	–	objętościowy wydatek gazu, <i>nm<sup>3</sup>/s</i>
$F$	–	pole przekroju poprzecznego rdzenia, <i>m<sup>2</sup></i>
$B$	–	ciśnienie barometryczne, <i>N/m<sup>2</sup></i>
$P_1$	–	ciśnienie przed próbką, <i>N/m<sup>2</sup></i>
$P_2$	–	ciśnienie za próbką, <i>N/m<sup>2</sup></i>
$\phi_e$	–	współczynnik porowatości efektywnej, %
$V_g$	–	wartość równa $k-c/P_{xc}$ , <i>cm<sup>3</sup></i> , ( $k$ i $c$ to współczynniki kalibracyjne)
$P_{xc}$	–	spadek ciśnienia helu
$V_b$	–	objętość rdzenia, <i>cm<sup>3</sup></i>
$\rho$	–	szkieletowa gęstość skały, <i>g/cm<sup>3</sup></i>
$m_r$	–	masa próbki w rtęci, <i>g</i>
$m_p$	–	masa próbki w powietrzu, <i>g</i>
$\nu_d$	–	dynamiczny współczynnik Poisson'a, <i>wartość bezwymiarowa</i>
$V_S$	–	prędkość propagacji fali poprzecznej S, <i>m/s</i>
$V_P$	–	prędkość propagacji fali podłużnej P, <i>m/s</i>
$E_d$	–	dynamiczny moduł Young'a, <i>GPa</i>
$K$	–	moduł sprężystości postaciowej, <i>Pa</i>
$\mu$	–	moduł sprężystości objętościowej, <i>Pa</i>
<i>BRIT</i>	–	wskaźnik kruchość brittleness, %

$YM_{BRIT}$	– kruchość z dynamicznego modułu Young'a, %
$PR_{BRIT}$	– kruchość z dynamicznego współczynnika Poisson'a, %
$YM$	– zmierzony dynamiczny moduł Young'a ( $E_d$ ), $GPa$
$PR$	– zmierzony dynamiczny współczynnik Poisson'a ( $\nu_d$ ), <i>wartość bezwymiarowa</i>
$YM_{min}$ ,	– wielkości określające minimalne i maksymalne wartości
$YM_{max}$	dynamicznego modułu Young'a spotykane w skałach osadowych
$PR_{min}$ ,	– wielkości określające minimalne i maksymalne wartości
$PR_{max}$	dynamicznego współczynnika Poisson'a spotykane w skałach osadowych
$\mu_c$	– lepkość pozorna, $Pa \cdot s$
$\tau_w$	– naprężenie ścinające, $Pa$
$\gamma$	– szybkość ścinania, $s^{-1}$
$K'$	– współczynnik konsystencji, $Pa \cdot s^n$
$n'$	– współczynnik potęgowy, <i>wartość bezwymiarowa</i>
$d_{av}$	– średnia średnica ziaren podsadzki, $mm$
$m_p$	– masa podsadzki, $g$
$C$	– koncentracja powierzchniowa podsadzki, $kg/m^2$
$A_f$	– pole powierzchni ściany szczeliny, $cm^2$
$d_w$	– wewnętrzna średnica komory Embedment, $cm$
$A_{v_i}$	– indywidualne pole powierzchni pomiędzy krzywą wgłębień a średnią linią profilu, $mm^2$
$A_{p_i}$	– indywidualne pole powierzchni pomiędzy krzywą wzniesień a średnią linią profilu, $mm^2$
$n_v$	– liczba wszystkich wgłębień, <i>wartość bezwymiarowa</i>
$n_p$	– liczba wszystkich wzniesień, <i>wartość bezwymiarowa</i>
$R_a$	– chropowatość powierzchni skały, $mm$
$H_{v_i}$	– indywidualna głębokość „wgłębień”, $mm$
$H_{p_i}$	– indywidualna wysokość „wzniesień”, $mm$
$L_i$	– długość odcinka pomiarowego profilu, $mm$
$A_{e_i}$	– indywidualne pole powierzchni pomiędzy krzywą wgnieceń ziaren podsadzki w pierwotną powierzchnię skały a średnią linią profilu, $mm^2$
$A_{w_i}$	– indywidualne pole powierzchni pomiędzy krzywą wycisku materiału skalnego a średnią linią profilu, $mm^2$
$n_e$	– liczba wszystkich wgnieceń, <i>wartość bezwymiarowa</i>
$n_w$	– liczba wszystkich wycisków, <i>wartość bezwymiarowa</i>
$H_{ew}$	– średnia głębokość wgniecenia ziaren podsadzki w ścianę szczeliny z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego z wgnieceń, $mm$
$H_e$	– średnia głębokość wgniecenia ziaren podsadzki w pierwotną powierzchnię skały, $mm$
$H_{e_i}$	– indywidualna głębokość wgniecenia ziarna podsadzki w pierwotną powierzchnię skały, $mm$
$H_w$	– średnia wysokość wycisku materiału skalnego pochodzącego z wgnieceń ziaren podsadzki w skałę, $mm$
$H_{w_i}$	– indywidualna wysokość wycisku materiału skalnego z wgniecenia ziarna podsadzki w skałę, $mm$
$W_{ew}$	– średnia szerokość wgniecenia ziarna podsadzki w ścianę szczeliny z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego z wgnieceń, $mm$

- $W_e$  – średnia szerokość wgniecenia ziarna podsadzki w pierwotną powierzchnię skały, *mm*
- $W_{e.i}$  – indywidualna szerokość wgniecenia ziarna podsadzki w pierwotną powierzchnię skały, *mm*
- $W_w$  – średnia szerokość wycisku materiału skalnego pochodzącego z wgniecenia ziarna podsadzki, *mm*
- $W_{w.i}$  – indywidualna wysokość wycisku materiału skalnego z wgniecenia ziarna podsadzki na pierwotnej powierzchni skały, *mm*
- $PUS_{ew}$  – procentowe uszkodzenie powierzchni czołowej rdzenia z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego z wgnieceń, %
- $PUS_e$  – procentowe uszkodzenie powierzchni skały spowodowane przez wgniecenia ziaren podsadzki, %
- $L_c$  – całkowita długość odcinka pomiarowego składającego się z pojedynczych odcinków z danych obszarów wytypowanych dla całej powierzchni czołowej rdzenia, *mm*
- $PUS_w$  – procentowe uszkodzenie powierzchni skały spowodowane przez wyciski materiału skalnego pochodzącego z wgnieceń ziaren podsadzki, %
- $H_{ew\_sr}$  – średnia głębokość wgniecenia ziaren podsadzki w ściany szczeliny z uwzględnieniem wysokości wycisku materiału skalnego, *mm*
- $H_{e\_sr}$  – średnia głębokość wgnieceń ziaren podsadzki w powierzchnię czołową górnego i dolnego rdzenia, *mm*
- $H_{w\_sr}$  – średnia wysokość wycisku materiału skalnego pochodzącego z wgnieceń ziaren na powierzchni czołowej górnego i dolnego rdzenia, *mm*
- $W_{ew\_sr}$  – średnią szerokość wgniecenia ziaren podsadzki w ściany szczeliny z uwzględnieniem szerokości wycisku materiału skalnego, *mm*
- $W_{e\_sr}$  – średnia szerokość wgniecenia ziaren podsadzki w pierwotną powierzchnię skały, *mm*
- $W_{w\_sr}$  – średnia szerokość wycisku materiału skalnego pochodzącego z wgniecenia ziaren podsadzki, *mm*
- $R_{a\_sr}$  – średnia chropowatość powierzchni skały, *mm*
- $H_{ew\_c}$  – całkowita głębokość wgnieceń ziaren podsadzki w ściany szczeliny (w skałę) wraz z wysokością wycisków materiału skalnego z tych wgnieceń, *mm*
- $H_{ew.G}$  – średnia głębokość wgniecenia ziaren podsadzki w skałę z uwzględnieniem wysokości wycisków materiału skalnego z wgnieceń ziaren podsadzki w powierzchnię czołową górnego rdzenia, *mm*
- $H_{ew.D}$  – średnia głębokość wgniecenia ziaren podsadzki w skałę z uwzględnieniem wysokości wycisków materiału skalnego z wgnieceń ziaren podsadzki w powierzchnię czołową dolnego rdzenia, *mm*
- $PUS_{e\_sr}$  – średnie procentowe uszkodzenie powierzchni ścian szczeliny spowodowane przez wgniecenia ziaren podsadzki w skałę, %
- $PUS_{ew\_sr}$  – średnie procentowe uszkodzenie powierzchni ścian szczeliny spowodowane przez wgniecenia ziaren podsadzki w skałę i wycisk materiału skalnego, %
- $W_{f.ef}$  – efektywna rozwartość szczeliny wypełnionej materiałem podsadzkowym, *mm*

$W_{fm}$	– maksymalna rozwartość szczeliny wypełnionej podsadzką, bez wystąpienia zjawiska wgniecenia ziaren podsadzki w ściany szczeliny i wycisków materiału skalnego pochodzących z wgnieceń, <i>mm</i>
$PEWF$	– procentowa efektywna rozwartość szczeliny z podsadzką, %
$PEPS$	– procentowa efektywna powierzchnia ściany szczeliny, %
$Sw_e$	– suma pomiarów wysokości wycisku materiału skalnego, <i>mm</i>
$\Delta Sw_e$	– całkowita długość odcinka pomiarowego, <i>mm</i>
$\Delta L_c$	– niepewność oszacowania $L_c$ , <i>mm</i>
$N_{min}$	– minimalna liczebność próby, <i>wartość bezwymiarowa</i>
$N_P$	– wielkość populacji, z której brana jest próba, <i>wartość bezwymiarowa</i>
$U_{0,95}$	– wartość krytyczna dla poziomu ufności 0,05, <i>wartość bezwymiarowa</i>
$f$	– wielkość frakcji, <i>wartość bezwymiarowa</i>
$e$	– wyliczony błąd maksymalny, w %
$\bar{x}_{i,1}$	– średnia dla mierzonego parametru dla obszaru $i$ , <i>mm</i>
$\bar{x}_{i,2}$	– średnia dla mierzonego parametru dla pozostałych obszarów (z wyłączeniem obszaru $i$ ), <i>mm</i>
$n_1$ i $n_2$	– liczebności prób, <i>wartość bezwymiarowa</i>
$s_1$ i $s_2$	– odchylenia standardowe dla prób, <i>mm</i>
$t_\alpha$	– jest zmienną o rozkładzie t-Studenta o $n_1+n_2-2$ stopniach swobody i $\alpha=0,05$
$H_o$	– hipoteza zerowa
$H_1$	– hipoteza alternatywna

## 1. Cel i teza pracy

**Celem** pracy było zbadanie wpływu zjawiska wgniatania ziaren materiału podsadzkowego w skałę złożową na efektywność podsadzenia wytworzonej szczeliny w zabiegu hydraulicznego szczelinowania, na przykładzie skał reprezentujących dwa krajowe niekonwencjonalne złoża węglowodorów. Dla osiągnięcia tego celu konieczne jest opracowanie odpowiedniej metodyki badań laboratoryjnych i analizy uzyskanych wyników, z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego pochodzącego z powstałych wgnieceń na powierzchni skały.

Dla realizacji założonego celu postawiono następującą **tezę**:

Na podstawie określenia parametrów opisujących zjawisko embedmentu jest możliwa ocena efektywności podsadzenia szczeliny w zabiegach stymulacji złóż niekonwencjonalnych.

Założono, iż uzyskane wyniki umożliwią wyznaczenie wielkości rozwarości wytworzonej szczeliny z podsadzką i uszkodzenia powierzchni skały, zależnych od warunków złożowych, technologii hydraulicznego szczelinowania złoża oraz koncentracji powierzchniowej podsadzki.

Zakres pracy obejmował następujące elementy:

- wybranie oraz wyznaczenie właściwości petrograficznych i petrofizycznych dla skał reprezentujących dwa różne krajowe złoża niekonwencjonalne,
- określenie warunków geologiczno-złożowych, niezbędnych do wykonania laboratoryjnej symulacji wgniatania ziaren podsadzki w skałę,
- zaproponowanie technologii stymulacji dedykowanej dla wybranych dwóch krajowych skał niekonwencjonalnych wraz z wyznaczeniem właściwości płynów szczelinujących oraz materiału podsadzkowego,
- opracowanie metodyki przygotowania próbek, obrazowania powierzchni skały oraz badania i analizy uzyskanych wyników pomiarów,
- wykonanie symulacji zjawiska embedmentu w warunkach laboratoryjnych, zbliżonych do warunków złożowych,
- wyznaczenie parametrów charakteryzujących zjawisko embedmentu,
- analiza zmian morfologii powierzchni skały,
- analiza efektywności podsadzenia szczeliny propantem.



## 2. Wprowadzenie

Zasoby węglowodorów w złożach konwencjonalnych stopniowo kurczą się w wyniku intensywnej ich eksploatacji. W związku z tym niekonwencjonalne złoża węglowodorów zaczynają odgrywać coraz ważniejszą rolę w światowym bilansie energetycznym. Szacowane zasoby węglowodorów zakumulowane w złożach niekonwencjonalnych są znacznie większe od tych w złożach konwencjonalnych. Tym samym intensywność prac geologiczno – poszukiwawczych nowych, trudno dostępnych zasobów węglowodorów zdecydowanie wzrosła. Dotyczy ona między innymi złóż gazu ziemnego typu „zamkniętego”, określanego jako wolny gaz występujący w porach oraz w naturalnych pęknięciach w zwięzłych skałach zbiornikowych. Charakteryzują się one małą i bardzo małą przepuszczalnością. W ostatnich latach duże zainteresowanie przemysłu naftowego w Polsce koncentrowało się na gazie z formacji łupkowych (ang. *gas shale*). Duże nadzieje pokłada się też w wydobyciu gazu z formacji piaskowcowych (ang. *tight gas sandstone*) oraz z pokładów węgla (ang. *coalbed methane*). Eksploatacja niekonwencjonalnych złóż węglowodorów jest możliwa i ekonomicznie uzasadniona jedynie po wykonaniu zabiegów intyensyfikacyjnych, takich jak np. wieloetapowe zabiegi hydraulicznego szczelinowania. Ich zadaniem jest wytworzenie w skale systemu licznych szczelin i spękań ułatwiających transport gazu ze złoża do odwiertu. Przepływ gazu przez wytworzone szczeliny i spękania jest uwarunkowany między innymi ich odpowiednim podsadzeniem (Economides i Nolte, 1989). W tym celu używa się różnego rodzaju materiałów podsadzkowych (ang. *proppant*). Wytworzone szczeliny charakteryzują się określoną geometrią, zależną od wielu czynników. O rozmiarach szczelin i sposobie ich propagacji podczas szczelinowania decydują między innymi właściwości geomechaniczne serii złożowej, warstw leżących w strefie spągu i stropu oraz rodzaj technologii użytej do stymulacji (Economides i Nolte, 1989). W przypadku złóż niekonwencjonalnych geometria ta jest bardziej złożona niż dla złóż konwencjonalnych. W złożach konwencjonalnych powstaje zazwyczaj szczelina dwuskrzydłowa, charakteryzowana takimi wielkościami jak rozwartość, wysokość i długość. Z kolei w złożach niekonwencjonalnych ważne jest utworzenie sieci licznych szczelin o efektywnej rozwartości i przewodności oraz o dużym zasięgu, umożliwiających przepływ węglowodorów ze złoża do odwiertu (Economides i Nolte, 1989; Chong i in., 2010; King, 2010; Kasza 2011a, b). Zarówno właściwy wybór technologii szczelinowania, związanej z doбором płynu szczelinującego i materiału podsadzkowego,

jak i minimalizacja niekorzystnych zjawisk ograniczających przepływ węglowodorów ze złoża do odwiertu jest jednym z ważniejszych zagadnień w procesie projektowania udostępniania złóż konwencjonalnych i niekonwencjonalnych.

Oryginalność pracy doktorskiej polega na zbadaniu zjawiska wgniatania ziaren materiału podsadzkowego w skałę (ang. *embedment*), reprezentującą wybrane polskie złoża niekonwencjonalne, takie jak: piaskowiec typu zamkniętego (ang. *tight sandstone*) oraz skała typu łupkowego (ang. *shale*). Badania wykonano z wykorzystaniem rozbudowanego stanowiska badawczego do laboratoryjnej symulacji zjawiska embedmentu, wraz z mikroskopem optycznym z wyposażeniem cyfrowym, kamerą CCD i oprogramowaniem do analizy powierzchni skały w wymiarze 2D i 3D. Z kolei do badania i analizy morfologii powierzchni skały wykorzystany został mikroskop elektronowy. W pracy opracowana została odpowiednia metodyka wykonywania badań, analizy wyników z uwzględnieniem statystyki oszacowania niepewności pomiaru i wielkości wyliczonych. Metody te zostały zweryfikowane w trakcie wykonanych badań laboratoryjnych dla dwóch wybranych typów skał z polskich złóż niekonwencjonalnych.

## 2.1. Studium warunków geologiczno-złożowych i właściwości skał złożowych niekonwencjonalnych złóż węglowodorów w Polsce

W ostatnich latach, znaczącą rolę w światowym bilansie energetycznym odgrywają złoża niekonwencjonalne. Zalicza się do nich złoża węglowodorów, w których gaz ziemny jest zamknięty w przestrzeni porowej lub matrycy skały, bądź też gaz uwięziony w hydracie. Należą do nich między innymi:

- piaskowcowe typu zamkniętego (ang. *tight sandstone*),
- węglany typu zamkniętego (ang. *tight carbonate*),
- łupki gazonośne (ang. *gas shale*),
- pokłady węgla (ang. *coalbed*),

oraz niezwiązane z akumulacją w skałach

- złoża hydratów (ang. *hydrate deposits*).

Duża rola tych złóż w bilansie energetycznym związana jest między innymi z kurczącymi się zasobami węglowodorów w złożach konwencjonalnych oraz poszerzeniem obszarów poszukiwań wiertniczych. Znaczący jest tutaj także wpływ rozwoju technologii wydobycia węglowodorów z dużych głębokości. Najwięcej złóż niekonwencjonalnych rozpoznano na obszarze Stanów Zjednoczonych Ameryki. Również na obszarze Polski znajdują się między innymi: piaskowcowe typu zamkniętego, węglany typu zamkniętego, łupki gazonośne oraz metanonośne pokłady węgla (Paktinat i in., 2006; Papiernik i in. 2010; Poprawa i Kiersnowski, 2008, 2010a, b; Raport PIG-PIB, 2012; Wójcicki i in., 2014). Zrealizowane w ostatnich latach liczne projekty badawcze, publikacje oraz raporty geologiczno-poszukiwawcze, pokazują znaczny potencjał występowania węglowodorów w polskich złożach niekonwencjonalnych. Wykonane projekty miały na celu poprawę rozpoznania struktur geologicznych oraz opracowanie technologii koniecznych do ich udostępniania. Według Poprawy (2018a), złoża niekonwencjonalne charakteryzują się specyficzną budową geologiczną, warunkami złożowymi oraz właściwościami petrofizycznymi. W eksploatacji takich złóż najważniejszy jest ekonomicznie opłacalny i samoczynny przyływ węglowodorów ze złoża do odwiertu.

Zasoby złóż niekonwencjonalnych, w bardzo ogólny sposób obrazuje schemat trójkątny zasobów gazu ziemnego, przedstawiony na rysunku 2.1 (Holditch, 2006; Paktinat i in., 2006).



**Rys. 2.1** Trójkąt zasobów gazu ziemnego (Holditch, 2006; Paktinat i in., 2006; zmienione)

Złóża niekonwencjonalne wyróżniają się znacznie większą objętością, niż ma to miejsce w przypadku złóż konwencjonalnych. Ze względu na duże głębokości zalegania takich złóż oraz ich niską przepuszczalność, wymagają one znacznych nakładów na rozpoznanie i udostępnienie ze względu na konieczność wykorzystania zaawansowanych technologii.

Dla właściwego wytypowania potencjalnego obszaru występowania złóż niekonwencjonalnych na terytorium Polski oraz oszacowania ich zasobów były i są prowadzone liczne prace naukowo-badawcze, projekty oraz sporządzane raporty. Polskimi jednostkami finansującymi tego typu badania są między innymi: Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, LOTOS Petrobaltic, PGNiG S.A. i Orlen Upstream.

### **2.1.1. Budowa geologiczna oraz obszary występowania złóż niekonwencjonalnych**

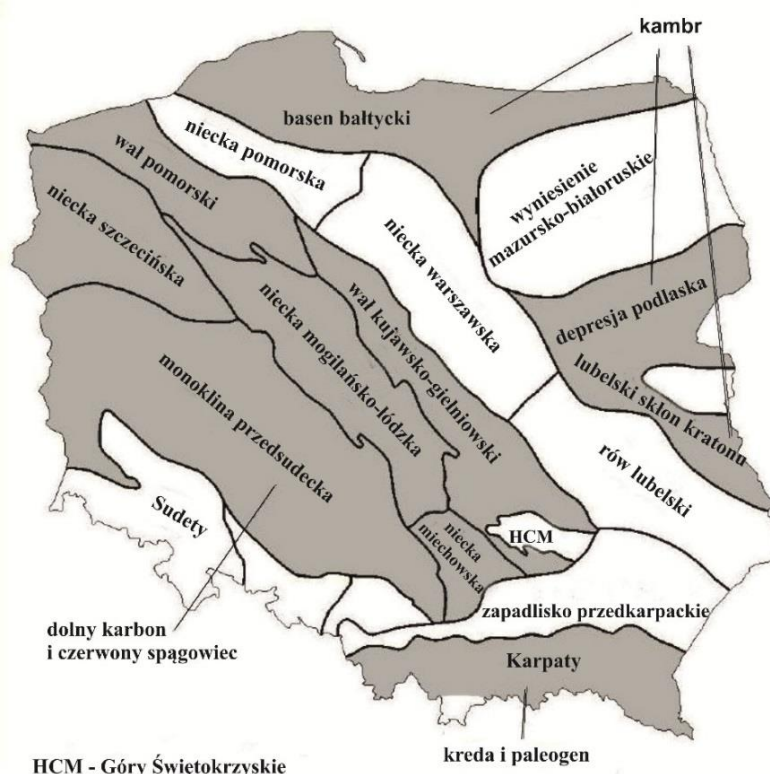
Kompleksy geologiczne związane z występowaniem gazu ziemnego zamkniętego w złożu niekonwencjonalnym na obszarze Polski zostały schematycznie przedstawione przez Poprawę i Kiersnowskiego (2010a). Według Poprawy i Kiersnowskiego (2010b) oraz Wójcickiego i in. (2014) gaz ziemny ma tutaj takie samo pochodzenie jak w przypadku złóż konwencjonalnych. W kompleksach tych, gaz jest zamknięty w skale złożowej.

Obecnie złoża w tzw. „systemie złóż w centrum basenów sedymentacyjnych” BCGS (ang. *Basin Centered Gas System*) są w skali globalnej jednymi z najbardziej istotnych zasobowo i ekonomicznie typów niekonwencjonalnych akumulacji węglowodorów (Meckel i Thomasson, 2008; Popov i in., 2000; Poprawa, 2018a; Sonnenberg i Meckel, 2017). Zastosowanie modelu złóż typu gazu zamkniętego

w systemie złóż w centrum basenów sedymentacyjnych (BCGS) jako koncepcji poszukiwawczej, znacząco wpłynęło na rozpoznanie ich potencjału naftowego (Cumella i in., 2008; Naik, 2003; Poprawa, 2018a). Do głównych cech tych złóż należą: ciągła akumulacja gazu w skali regionalnej, brak wyraźnego uszczelnienia lub wyraźnie wykształconej pułapki, występowanie wody zwykle powyżej skał gazonośnych, bardzo duże zasoby geologiczne, bardzo niska przepuszczalność skały zbiornikowej, występowanie naturalnej szczelinowości skały oraz występowanie skały zbiornikowej, zazwyczaj blisko skały macierzystej (Naik, 2003; <https://www.pgi.gov.pl>, 2020).

Największą miąższość skały zbiornikowej (znacznie większą niż złóż konwencjonalnych) posiadają piaskowce typu zamkniętego. Może ona dochodzić nawet do jednego kilometra (Wójcicki i in., 2014). Natomiast w przypadku skał ilasto-mułkowcowych (tzw. łupków), miąższość jest mniejsza niż przeciętnie dla skał konwencjonalnych i wynosi maksymalnie 100 metrów.

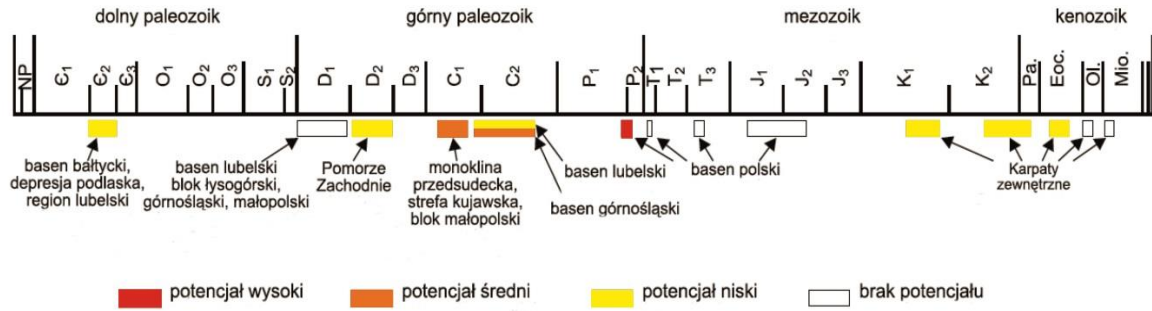
Potencjalne obszary występowania gazu ziemnego zamkniętego w Polsce zostały zobrazowane przez Poprawę i Kiersnowskiego (2008) oraz Wójcickiego i in. (2014), (Rys. 2.2).



**Rys. 2.2** Jednostki geologiczne Polski z zaznaczonym kolorem szarym strefami potencjalnego występowania gazu ziemnego (Poprawa i Kiersnowski, 2008; Wójcicki i in., 2014)

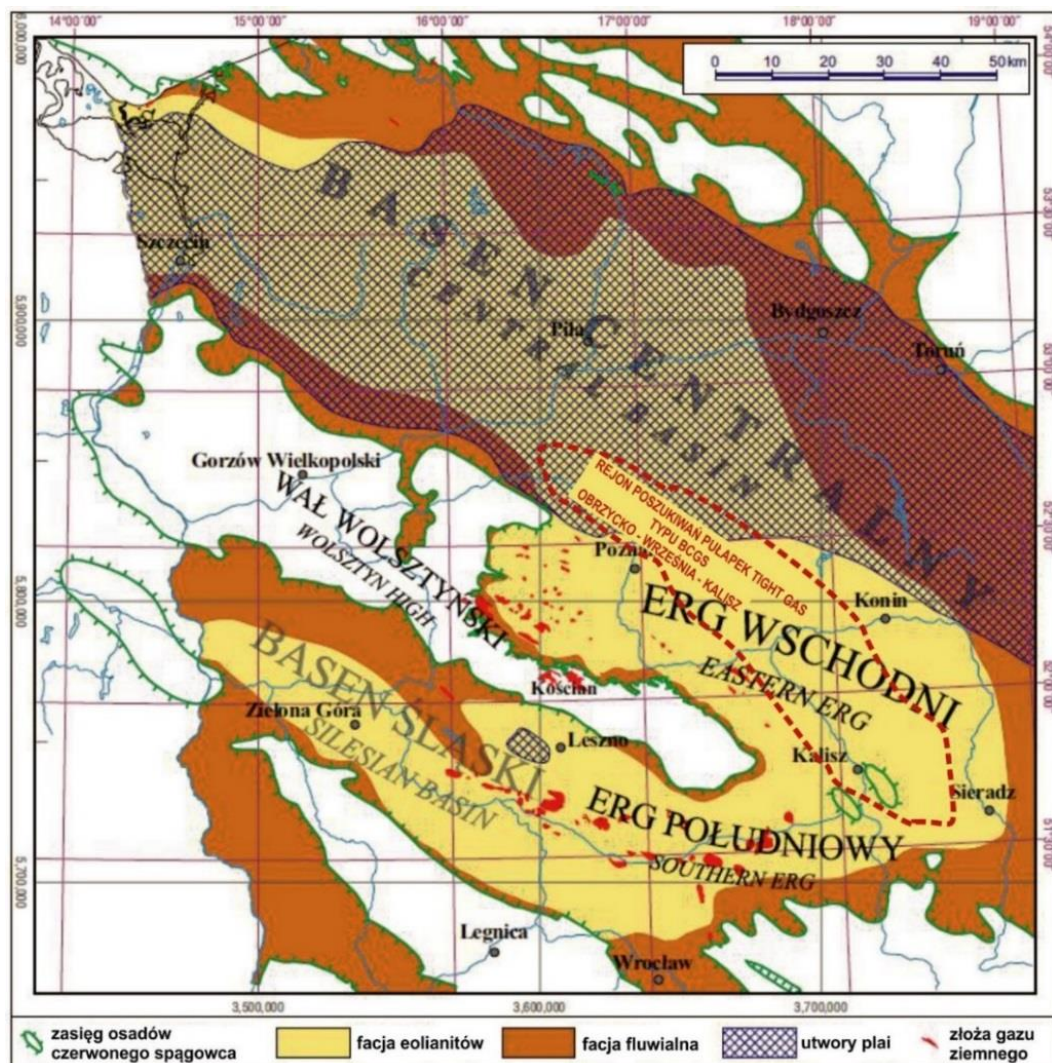
Potencjał formacji zbiornikowych gazu ziemnego zamkniętego przedstawia diagram (Rys. 2.3), opracowany przez Poprawę i Kiersnowskiego (2010a).





**Rys. 2.3** Pozycja stratygraficzna i obszary występowania najważniejszych formacji potencjalnie zbiornikowych dla węglowodorów w Polsce pod kątem możliwości powstawania w nich gazu zamkniętego (Poprawa i Kiersnowski, 2010a)

W wyniku środowiskowej analizy utworów czerwonego spągowca, wykonanych przez Papiernika i in. (2010), wyróżnione zostały regionalne jednostki paleogeograficzne, zlokalizowane na terytorium Polski, istotne z punktu widzenia akumulacji węglowodorów (Rys. 2.4).



**Rys. 2.4** Przestrzenny rozkład głównych systemów depozycyjnych górnego czerwonego spągowca w polskiej części basenu dolno-permskiego (Papiernik i in., 2010, Wójcicki i in., 2014; zmienione)

Największą z nich jest basen centralny (Papiernik i in., 2010; Pokorski, 1998). Wzdłuż południowego obrzeżenia basenu centralnego występują piaskowce eoliczne, które są interpretowane jako obszar wydmowy i określane jako erg wschodni (Kiersnowski, 1997; Papiernik i in., 2010). Na południe od niego zlokalizowana jest rozległa jednostka paleogeograficzna, tj. basen śląski. Strefa ta jest zdominowana przez sedimentację eoliczną i fluwialną. Powstały tu pas wydm wyróżniony jest jako erg południowy (Buniak, 2005; Kiersnowski, 1997). Obszar basenu centralnego i basenu śląskiego rozdziela wał wolsztyński. Jego obrzeżenia zdominowane są przez utwory reprezentujące fluwialny system depozycyjny (Poszytek, 2007).

Według Poprawy i Kiersnowskiego (2008) oraz Wójcickiego i in. (2014) do najbardziej perspektywicznych, krajowych złóż węglowodorów zamkniętych w piaskowcowej skale zbiornikowej zalicza się (Rys. 2.5):

- permskie piaskowce czerwonego spągowca strefy poznańsko-kaliskiej,
- piaskowce karbonu strefy wielkopolsko-śląskiej,
- piaskowce kambru w zachodniej części basenu bałtyckiego.



**Rys. 2.5** Występowanie najbardziej perspektywicznych, krajowych złóż gazu zamkniętego w piaskowcach (Dyrka i in., 2020; Wójcicki i in., 2014; zmienione)

Wójcicki i in. (2014) sugerują, że najważniejszymi skałami potencjalnie zbiornikowymi dla złóż zamkniętego gazu ziemnego w Polsce są piaskowce czerwonego spągowca, zlokalizowane w basenie permskim. Uważają oni, że największe perspektywy dla poszukiwań gazu ziemnego zamkniętego, związane są z eolicznymi i fluwialnymi piaskowcami czerwonego spągowca, zlokalizowanymi w strefie poznańsko-kaliskiej. Znajdują się one głównie na obszarze na południowy-wschód, północ i północny-zachód od Poznania. Według Kiersnowskiego (1997), w południowo-zachodniej części basenu permskiego znajdują się w przewodzie piaskowce eoliczne, podrzędne fluwialne. Występują one pod przykryciem osadów cechsztynu, które stanowią pewnego rodzaju uszczelnienie dla licznych konwencjonalnych pułapek gazu. Skałą zbiornikową dla konwencjonalnych, jak i niekonwencjonalnych nagromadzeń gazu ziemnego są piaskowce eoliczne charakteryzujące się homogenicznością i znaczną miąższością (Wójcicki i in., 2014).

Strop czerwonego spągowca basenu permskiego na obszarze na południowy-wschód, północ i północny-zachód od Poznania zalega na głębokości od 3500 do 5000 m p.p.m. (Buniak i in., 2008; Wójcicki i in., 2014). Miąższość kompleksu w stropowej części profilu czerwonego spągowca, o petrofizycznych właściwościach sprzyjających występowaniu gazu ziemnego, jest rzędu od 100 m do 200 m (Kiersnowski i in., 2010). Według Wójcickiego i in. (2014), piaskowce eoliczne czerwonego spągowca mogą mieć miąższość nawet od 200 m do 700 m. Z kolei Buniak i in. (2008) sugerują występowanie również tzw. głębokiego czerwonego spągowca (ang. *deep tight sands*), zlokalizowanego w częściowo rozpoznanym rejonie wierceń Pławce-Komorze-Malanów. Wójcicki i in. (2014) uważają, że maksymalna głębokość występowania piaskowców eolicznych czerwonego spągowca, złożami gazu zamkniętego może sięgać nawet 6000 m. Głębokość tą sugerują w oparciu o najgłębszą część polskiego basenu czerwonego spągowca (Seedhouse i in., 1996) oraz analizę porowatości wtórnej (Buniak i in., 2008). Natomiast, według Sucha i in. (2010) dobrze wysortowane piaskowce eoliczne czerwonego spągowca mogą również występować na głębokościach, rzędu 7000 m.

Podłoże permu budują piaskowce karbonu dolnego (Poprawa i Kiersnowski, 2008; Wójcicki i in., 2014). Występują one w strefie wielkopolsko-śląskiej w podłożu utworów monokliny przedsudeckiej. Łączna miąższość piaskowca karbonu dolnego (tj. kompleks fliszowych osadów wizenu i dolnego namuru), zbudowanego z naprzemianległych iłowców, mułowców, piaskowców oraz zlepieńców waha się od kilkuset do nawet kilku tysięcy metrów (Wójcicki i in., 2014). Do stref perspektywicznych dla występowania gazu



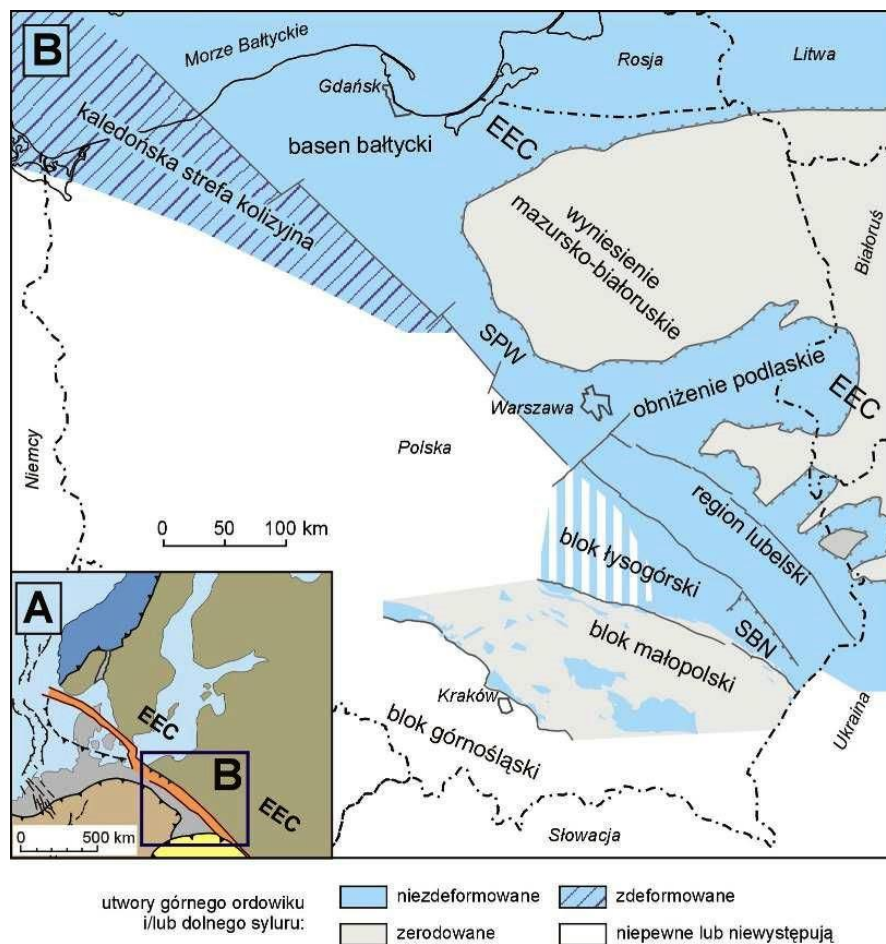
zamkniętego zalicza się tutaj południową i południowo-zachodnią część strefy wielkopolsko-śląskiej. Głębokość występowania stropu utworów karbonu dolnego w tej strefie jest rzędu od 1000 m do 3000 m. Miąższość horyzontów piaskowcowych zawierających gaz zamknięty może być nawet rzędu 1000 m.

Według Wójcickiego i in. (2014), najmniej perspektywnymi skałami zbiornikowymi gazu zamkniętego są piaskowce kambry środkowego. Występują one w zachodniej części basenu bałtyckiego. Potencjał dla występowania złóż niekonwencjonalnych jest tutaj ograniczony do lokalnych stref o wysokiej dojrzałości termicznej i odpowiedniej porowatości. Obszar występowania tego typu złóż jest ograniczony uskokiemi tektonicznymi. Strop utworów kambryjskich zalega na głębokości od 1800 m do 3100 m i zapada w kierunku południowym.

Regionalna ciągła, niekonwencjonalna akumulacja węglowodorów związana z modelem BCGS, według Poprawy (2018a, 2018b) występuje w obrębie karbońskiego basenu górnośląskiego (BGŚ). Model ten zakłada związane wykształcenie skał potencjalnie zbiornikowych na głębokościach od 3500 m do 5000 m. Rolę skał zbiornikowych pełnią tutaj pakiety piaskowców serii paralicznej (Poprawa, 2018a). W centralnej części basenu górnośląskiego występują ponadto pokłady węgla kamiennego oraz pakiety łupków węglowych. Stanowią one efektywną skałę macierzystą dla gazu ziemnego. Brak jest tutaj głębokich otworów, które umożliwiłyby dokładną weryfikację występowania węglowodorów w basenie karbońskim.

W okresie ostatnich kilku lat, miały miejsce szeroko zakrojone prace poszukiwawczo-badawcze, wiertnicze i eksploatacyjne złóż zawierających gaz ziemny zaadsorbowany w skałach ilasto-mułowcowych (tzw. *gas shale*). Według Poprawy (2010b) gaz ziemny występuje w kompleksach łupkowych skał macierzystych i nie wymaga on obecności pułapek złożowych, a strefy nasycenia gazem mają charakter obocznie ciągły w skali regionalnej.

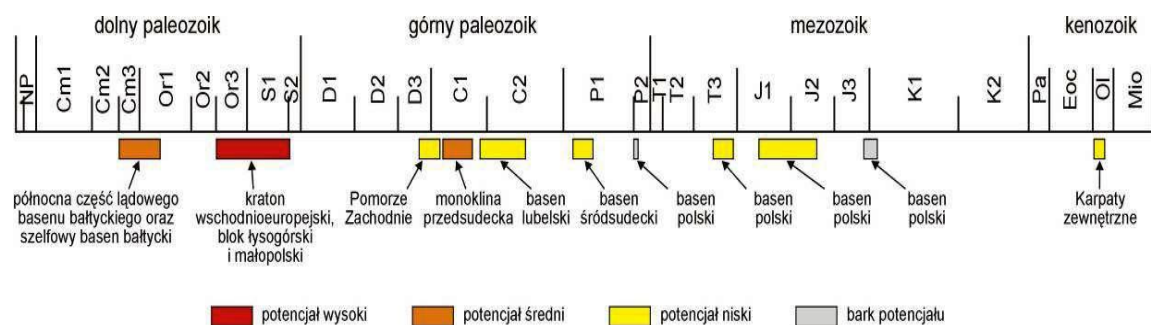
W pierwszym raporcie Państwowego Instytutu Geologicznego - Państwowego Instytutu Badawczego, przedstawionym w 2012 roku, najbardziej perspektywiczne obszary występowania węglowodorów w formacjach łupkowych na terenie Polski, zostały wytypowane przez Poprawę (2010a), (Rys. 2.6).



EEC – kraton wschodnioeuropejski. SPW – strefa Płock-Warszawa. SBN – strefa Biłgoraj-Narol.

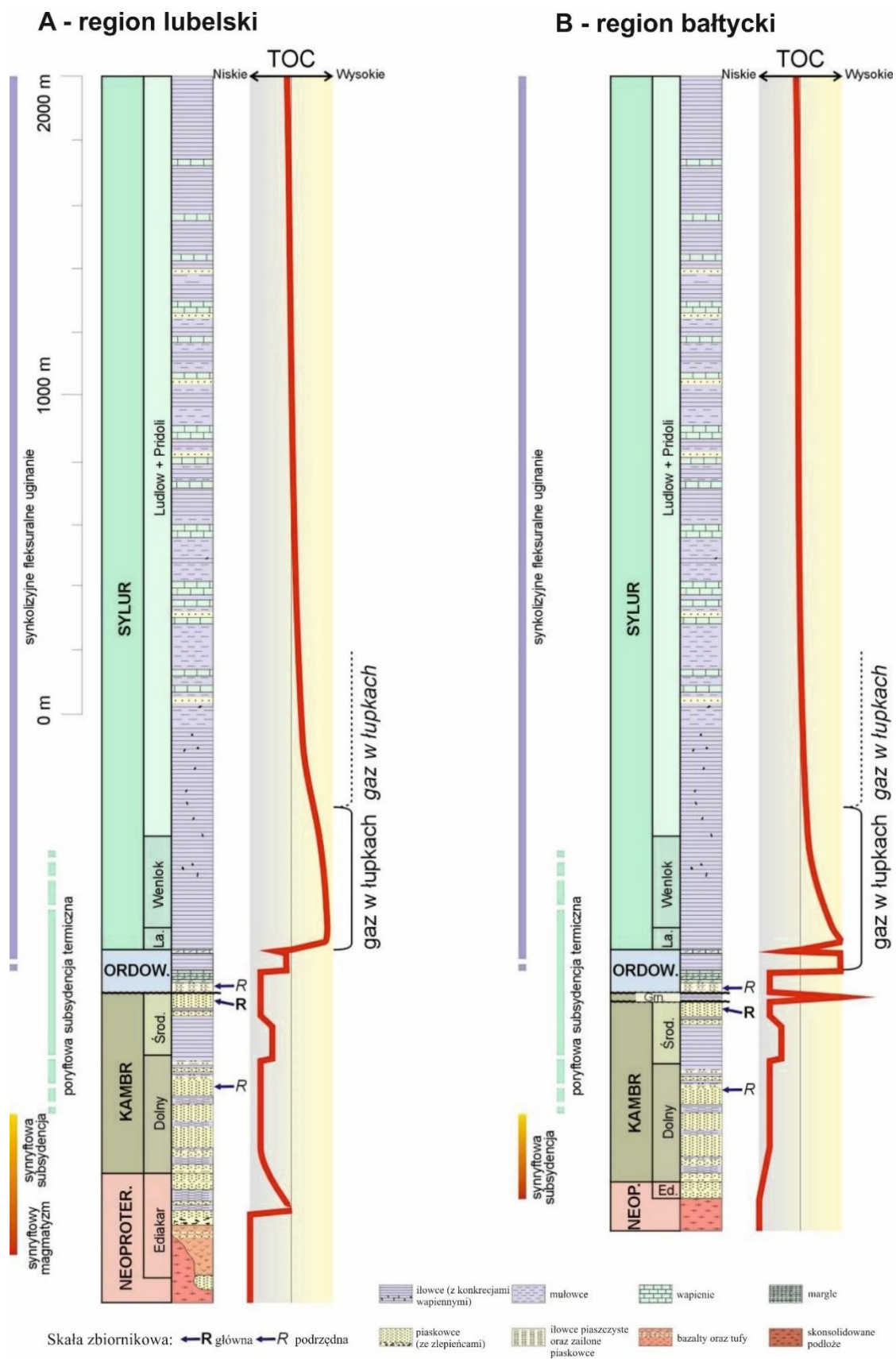
**Rys. 2.6** Lokalizacja dolnopaleozoicznych basenów sedymentacyjnych oraz obszarów występowania łupków górnego ordowiku i dolnego syluru (Poprawa, 2010a)

Ważnym kryterium, określającym zakwalifikowanie formacji łupkowej do strefy złożowej była jej miąższość (co najmniej 15 m) i zawartość całkowitego węgla organicznego TOC (ang. *Total Organic Carbon*) co najmniej 2% (Raport PIG-PIB, 2012). Potencjał występowania nagromadzeń gazu ziemnego w formacjach łupkowych przedstawiony jest na diagramie (Rys. 2.7), opracowanym przez Poprawę (2010b, 2010c).

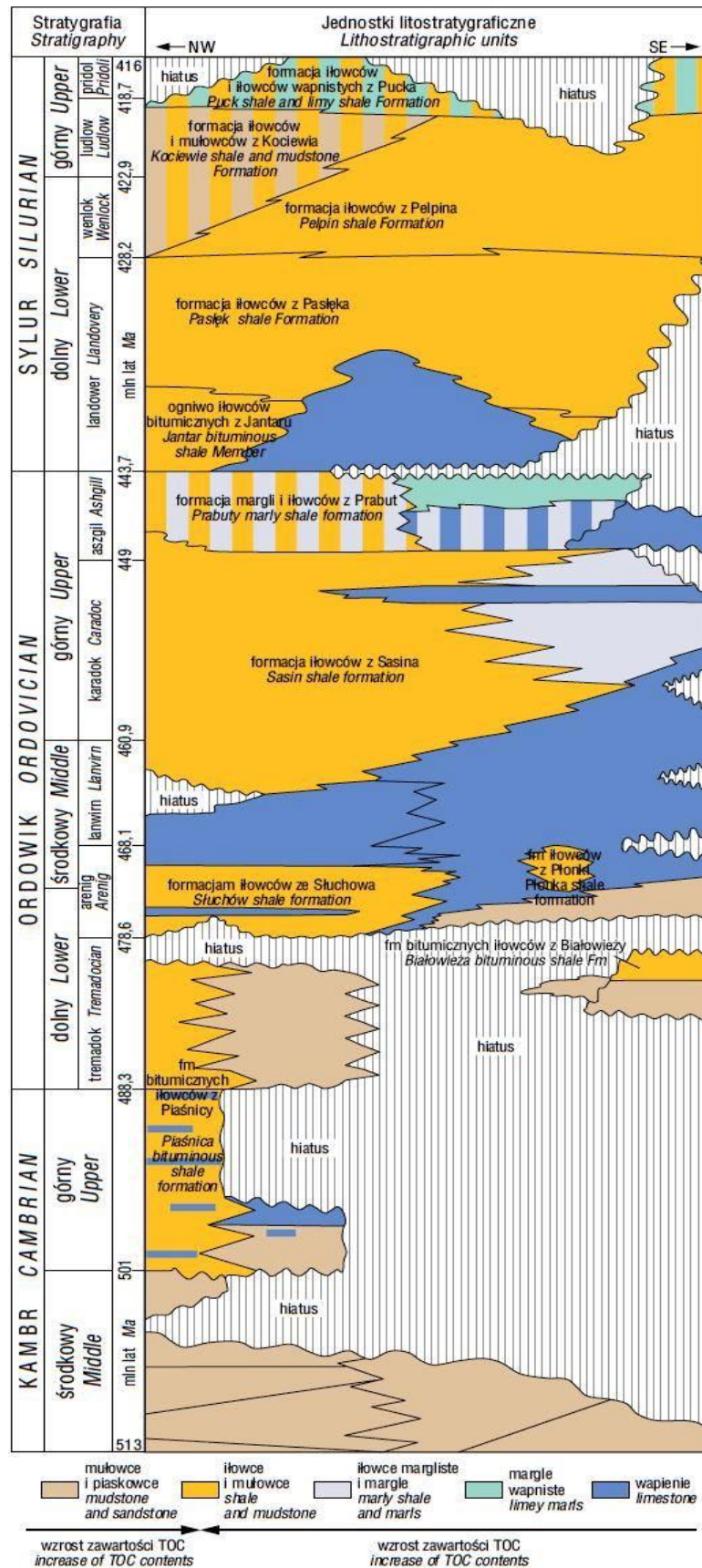


**Rys. 2.7** Pozycja stratygraficzna i obszary występowania najważniejszych formacji iłowcowo-mułowcowych o podwyższonej zawartości substancji organicznej w Polsce (Poprawa, 2010b, 2010c)

Według Poprawy i Kiersnowskiego (2008), Poprawy (2010b) i Raportu PIG-PIB (2012), główną formacją, spełniającą kryteria decydujące o możliwości występowania gazu ziemnego w skałach ilasto-mułowcowych dolnego paleozoiku na kratonie wschodnioeuropejskim są utwory dolnego syluru i górnego ordowiku w basenie bałtyckim i basenie lubelsko-podlaskim. Skumulowana miąższość łupków bogatych w substancję organiczną w obrębie kompleksu dolnopaleozoicznego może wynosić co najmniej kilkadziesiąt metrów (Poprawa, 2010c). Uproszczony profil litostratygraficzny wraz z pozycją łupków wzbogaconych w substancję organiczną i potencjalnie zawierających gaz ziemny, został przedstawiony przez Poprawę i Pacześną (2002), (Rys. 2.8). Natomiast miąższość, wykształcenie facjalne i charakterystyka geochemiczna łupków dolnego paleozoiku została opracowana przez Modlińskiego i Szymańskiego (1997, 2008), Modlińskiego i in. (2006) oraz Szymańskiego (2008), (Rys. 2.9). W profilu syluru i ordowiku, widoczne są poziomy o podwyższonych akumulacjach gazu, które stanowią potencjalne formacje złożowe. Należą do nich między innymi formacja iłowców z Pelpina, ogniwo z Jantaru, formacja z Sasina oraz znajdujące się pomiędzy nimi formacje z Pasłęka i z Prabut.



**Rys. 2.8** Uproszczony profil litostratigraficzny dolnego paleozoiku w (A) regionie lubelskim oraz (B) basenie bałtyckim wraz z pozycją łupków wzbogaconych w substancję organiczną i potencjalnie zawierających gaz ziemny i/lub ropę naftową w łupkach (Poprawa i Paczeńska, 2002; Poprawa 2006a, 2006b, 2010a)



**Rys. 2.9** Pozycja głównych formacji iłowcowych w profilu stratygraficznym dolnego paleozoiku na zachodnim skłonie kratonu wschodnioeuropejskiego (kompilacja na podstawie Modliński i Szymański, 1997, 2008; Modliński i in., 2006; Poprawa 2010b; Szymański, 2008)



Według Szymańskiego (2008) oraz Raportu PIG-PIB (2012), bitumiczne łupki górnego kambru występują w północnej części lądowego sektora basenu bałtyckiego oraz jego szelfowej części. Miąższość ich może sięgać 34 m. Kolejną formację osadów stanowią łupki górnego ordowiku, głównie karadoku. Występują one w centralnej i zachodniej części basenu bałtyckiego oraz w zachodniej części obniżenia podlaskiego (Raport PIG-PIB, 2012). Miąższość łupków górnego ordowiku w basenie bałtyckim jest rzędu od 3,5 m do 70 m (Modliński i Szymański, 1997). Z kolei iłowce i mułowce lądoweru występują na całym obszarze basenu bałtyckiego i lubelsko-podlaskiego. Są tu one reprezentowane w dolnej części przez iłowce bitumiczne, lokalnie zastępowane obocznie przez wapienie, zaś w wyższej części przez iłowce i mułowce (Modliński i in., 2006). Miąższość utworów lądoweru jest zazwyczaj rzędu od 20 m do 70 m (Modliński i in., 2006, Raport PIG-PIB, 2012). Według Raportu PIG-PIB (2012) głębokość zalegania łupków górnego ordowiku i dolnego syluru, w basenie bałtyckim osiąga od 1000 m do 4500 m.

W 2013 roku, została opracowana przez Mikołajewskiego sekcja chronostratygraficzna i litostratygraficzna dolnego paleozoiku z regionu lubelskiego i bałtyckiego. Zaprezentował ją Makos (2014) w prezentacji związanej z działalnością PGNiG w zakresie poszukiwań niekonwencjonalnych złóż węglowodorów w Polsce. W profilu stratygrafii dla odwiertu Lubocino, wytypowano dwa najbardziej perspektywiczne poziomy dla występowania węglowodorów oraz wykonania zabiegów stymulacyjnych. Pierwszy z nich zlokalizowany był w formacji margli i iłowców z Pasłęka (sylur - lądower) na głębokościach rzędu od 2893 m do 2907 m. Z kolei drugi poziom stanowiła formacja iłowców z Sasina (ordowik - karadok - górny lanwirn), występująca na głębokościach rzędu od 2915 m do 2940 m. Z kolei w profilu odwiertu Borcz, pierwszy poziom stratygraficzny występuje na głębokości rzędu od 3680 m do 3695 m, a drugi od 3700 m do 3715 m.

Poprawa i Kiersnowski (2008) oraz Poprawa (2010b) wnioskuje, że gaz o mniejszym znaczeniu występuje w ilastych kompleksach w obrębie utworów dolnego karbonu w strefie wielkopolskiej (tj. rejon monokliny przedsudeckiej) oraz w górnokambryjskich lub tremadockich łupkach alunowych w basenie bałtyckim.

Osobnym zagadnieniem pozostają akumulacje gazu ziemnego w związłych skałach węglanowych oraz w pokładach węgla kamiennego, głównie w zagłębiu górnośląskim i basenie lubelskim. Nie zostały one tutaj opisane, ze względu na fakt, iż w rozprawie doktorskiej nie badano skał, pochodzących z tych formacji.

### **2.1.2. Właściwości petrograficzne wybranych skał złożowych**

Do właściwości petrograficznych skały zalicza się między innymi ich strukturę i skład mineralny.

Według Karnkowskiego (1993), eoliczne i fluwialne piaskowce czerwonego spągowca charakteryzują się dobrym wysortowaniem, a ich spoiwo jest bardzo różnorodne. Obok spoiwa żelazisto-ilastego występuje również spoiwo krzemionkowe, węglanowe lub siarczanowe. Według Sucha i in. (2010), piaskowce czerwonego spągowca posiadają silną cementację siarczanową i węglanową.

Piaskowce karbonu dolnego strefy wielkopolsko-śląskiej, charakteryzują się strukturą drobno i bardzo drobnoziarnistą, z niewielką domieszką frakcji zwirowej (Krzemiński, 2005). Piaskowce karbonu dolnego stanowią element kompleksu fliszowych osadów, zbudowanego z naprzemianległych iłowców, mułowców, piaskowców oraz zlepieńców (Wójcicki i in., 2014). Zailenie piaskowca zamkniętego jest tutaj rzędu od 24% do 51%.

Piaskowce kambru środkowego, występujące w zachodniej części basenu bałtyckiego charakteryzują się silną cementacją kwarcową (Wójcicki i in., 2014). Są to zazwyczaj drobnoziarniste piaskowce kwarcowe scementowane spoiwem kwarcowym typu porowego z dodatkiem spoiwa węglanowego.

W przypadku skał ilasto-mułowcowych (łupkowych), najbardziej charakterystyczne dla basenu bałtyckiego są osady ordowiku i syluru (Such i in., 2017). Formacja iłowców z Pelplina (sylur) jest reprezentowana przez graptolitowe, laminowane mułowce (zdecydowanie rzadziej iłowce), barwy ciemnoszarej i szarej, miejscami wapniste. Formację iłowców z Pasłęka (sylur) stanowią iłowce i mułowce o zmiennych barwach. iłowce są jasno i ciemnozielone i zielonoszare, natomiast mułowce są ciemnoszare i czarne. W przypadku ogniwa iłowców bitumicznych z Jantaru (sylur), stanowią je czarne, bezwapniste iłowce i mułowce bitumiczne. Mamy tutaj do czynienia z iłowcami o zmiennej ilości składników detrytycznych, takich jak kwarc, skalenie i węglany. Z kolei formację margli i iłowców z Prabut (ordowik) stanowią szare iłowce wapniste i margliste przechodzące w stropie w margle, margle zapiaszczone, mułowce i piaskowce. Formację iłowców z Sasina (ordowik) stanowią czarne, ciemnoszare i szarzielone, bezwapniste iłowce i mułowce. (Such i in., 2017)

Przykładowo, skała łupkowa, badana przez Sucha i in. (2017), pochodząca z powyżej przedstawionego obszaru charakteryzuje się zawartością kwarcu 25,1%; plagioklazów 4,3%; skaleni 2,1%; węglanów 6,4%; pirytu 3,7%; markasytu 2,3%;

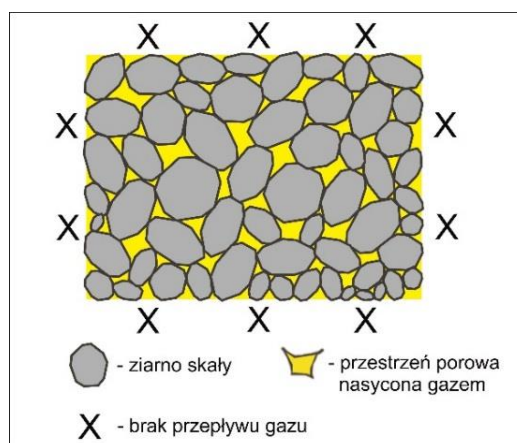
anatazu 0,2%; miki i illitu 40,4%; minerałów mieszanopakietowych illit/smektyt 7,2%; chlorytu 7,4% i kaolinitu 0,9%. Natomiast skład mineralny skał łupkowych basenu bałtyckiego jest następujący: 50% minerały ilaste, 27% kwarc, 9,7% kalcyt 1,3% skalenie.

Według Mikołajewskiego, w odwiertach Lubocino i Borcz, perspektywiczne formacje margli i iłowców z Pasłęka (sylur - landower) reprezentowane są przez sublitoralne, laminowane czarne iłowce i mułowce bitumiczne (Makos, 2014). Z kolei perspektywiczne formacje iłowców z Sasina (ordowik - karadok - górny lanwirn) reprezentowane są przez sublitoralne, laminowane czarne iłowce i mułowce bitumiczne z licznymi wkładkami bentonitów.

### 2.1.3. Właściwości petrofizyczne wybranych skał złożowych

Do właściwości petrofizycznych skały zalicza się między innymi przepuszczalność i porowatość oraz parametry sprężyste skały.

Skały w niekonwencjonalnych złożach węglowodorów charakteryzują się obecnością porów słabo połączonych ze sobą. Utrudnia to przepływ węglowodorów ze skały do odwiertu, a tym samym ogranicza eksploatację gazu z takich złóż. Niska przepuszczalność drobnoziarnistej skały zbiornikowej powoduje bardzo niskie tempo przyływu węglowodorów do odwiertu oraz szybki jego spadek podczas eksploatacji złoża. Na polepszenie przepływu węglowodorów ze skały zbiornikowej do odwiertu wpływa występowanie w niej naturalnych spękań (Wójcicki i in., 2014). Należy tutaj także zaznaczyć, że rozkład przestrzeni porowej w takiej skale zbiornikowej jest bardzo nieregularny. Zobrazowanie przestrzeni porowej dostępnej dla gazu w skale piaskowcowej typu zamkniętego przedstawili Wójcicki i in. (2014), (Rys. 2.10).



**Rys. 2.10** Schemat przestrzeni porowej niekonwencjonalnej skały piaskowcowej typu zamkniętego (*tight gas*), (Wójcicki i in., 2014; zmienione)



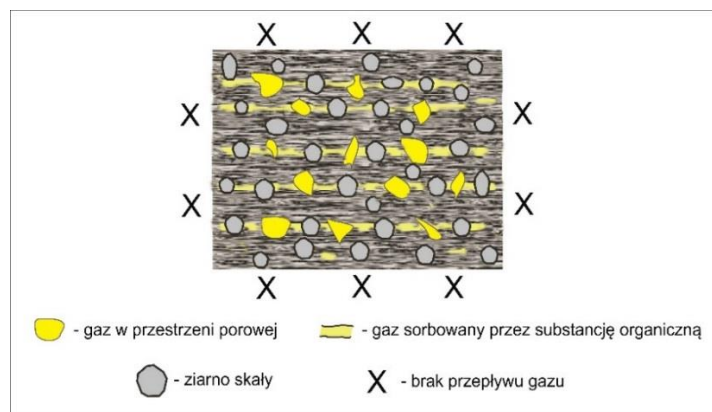
W polskich niekonwencjonalnych złożach węglowodorów, eoliczne piaskowce czerwonego spągowca występujące w basenie permskim charakteryzują się wysoką pierwotną porowatością, nawet w strefach o zaawansowanej diagenecie (Wójcicki i in., 2014). Przepuszczalność tych utworów jest silnie zredukowana, a ich porowatość pozostaje częściowo zachowana. Według Sweeney i Burnham (1990) oraz Buniaka i in. (2008), piaskowce te charakteryzują się współczynnikiem porowatości całkowitej w przedziale od 3% do 10%. Z kolei, Such i in. (2010) stwierdzają, że współczynnik porowatości piaskowca czerwonego spągowca na głębokościach rzędu 7000 m, może także osiągać wartość rzędu 10%, a ich współczynnik przepuszczalności jest poniżej  $1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ .

Piaskowce typu zamkniętego, występujące w dolnym karbonie strefy wielkopolsko-śląskiej, charakteryzują się współczynnikiem porowatości efektywnej rzędu od 3% do 9% oraz współczynnikiem przepuszczalności rzędu od  $0,00002 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$  do  $0,0003 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ . Natomiast współczynnik porowatości całkowitej jest rzędu od 3% do 5%. (Wójcicki i in., 2014)

Piaskowce kambru środkowego w zachodniej części basenu bałtyckiego charakteryzują się zredukowaną porowatością i przepuszczalnością (Wójcicki i in. 2014). Wykazują one mikroporowy typ struktury, są jednak intensywnie szczelinowane (Karczewska i Żurawski, 1998). Współczynnik przepuszczalności tych skał jest poniżej  $0,1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ , natomiast współczynnik porowatości efektywnej jest powyżej 2%, porowatość całkowita odpowiednio większa.

W złożach gazu ziemnego tworzących niekonwencjonalne, regionalnie ciągłe akumulacje węglowodorów w karbońskim basenie górnośląskim (BGŚ), skała charakteryzuje się bardzo niskim współczynnikiem przepuszczalności rzędu od  $0,1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$  do  $0,001 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ , oraz współczynnikiem porowatości w przedziale od 5% do 10%, (Cumella i in., 2008; Law, 2002; Meckel i Thomasson, 2008; Poprawa, 2018a).

Przestrzeń porową dostępną dla gazu w skale ilasto-mułowcowej przedstawił Poprawa (2010b), (Rys. 2.11).



**Rys. 2.11** Schemat przestrzeni porowej niekonwencjonalnej skały ilasto-mułowcowej (*gas shale*) (Poprawa, 2010b; zmienione)

Gaz w takiej skale występuje w formie wolnej przede wszystkim w przestrzeni porowej (Poprawa, 2010b). Występują tutaj również mikropory w obrębie lamin wzbogaconych w krzemionkę oraz inne detrytyczne komponenty, jak również naturalne szczeliny i mikroszczeliny. Ponadto łupki zawierają gaz ziemny adsorbowany przez nierozpuszczalną substancję organiczną oraz przez minerały ilaste (Cheng i Huang, 2004). Według Sucha i in. (2017) współczynnik przepuszczalności skały łupkowej w basenie bałtyckim jest najczęściej rzędu od  $0,001 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$  do  $0,000001 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ , a jej współczynnik porowatości całkowitej wynosi 6,2% (Such i in., 2017).

Określenie zależności między stanem naprężenia oraz stanem odkształcenia jest głównym celem badań i analiz geomechanicznych (Dziedzic i Łukaszewski, 2015). Według tych autorów, stan naprężenia dla ośrodka skalnego znajdującego się na głębokości kilku kilometrów ma charakter złożony. Jest on uwarunkowany przede wszystkim ciężarem skał nadkładu, naprężeń pionowych oraz maksymalnymi i minimalnymi naprężeniami bocznymi (horyzontalnymi). Moduły sprężystości skały są zależne od typu litologicznego, tj. składu mineralnego, porowatości, zailenia, nasycenia bituminami oraz głębokości ich występowania. Skały charakteryzują się również zróżnicowaną „kruchością” (ang. *brittleness*), którą można rozpatrywać w aspekcie składu mineralnego i parametrów sprężystych. Według Bały (1990) kwarc najczęściej charakteryzuje się modułem Young’a rzędu 89,1 GPa i współczynnikiem Poisson’a rzędu 0,087. Natomiast ility mają moduł Young’a około 15,8 GPa, a współczynnik Poisson’a 0,318.

Bała (2017) przedstawiła wyniki badań parametrów sprężystych pomierzonych akustyczną sondą dipolową lub obliczonych na podstawie teoretycznych modeli z kilku otworów położonych w basenie bałtyckim i trzech na szelfie. Obejmowały one między

innymi: formacje iłowców z Pasłęka (dolny sylur, landower); formacje z ogniwa iłowców bitumicznych z Jantaru (dolny sylur, landower); formację margli i iłowców z Prabutów (ordowik górny, aszgil); formację iłowców z Sasina (ordowik środkowy, karadok). Wymienione formacje iłowców charakteryzują się modułem Young'a rzędu  $18 \div 60$  GPa i współczynnikiem Poisson'a od 0,17 do 0,33.

Według Dziedzica i Łukaszewskiego (2015) parametry sprężystości i odkształcenia iłowców syluru i ordowiku dla głębokich stref górotworu charakteryzują się dużą zmiennością. Autorzy ci wykonali doświadczalne badania geomechaniczne (w celu wyznaczenia parametrów sprężystości), stosując konwencjonalne trójosiowe ściskanie. Dla iłowców sylurskich uzyskali dynamiczny moduł Young'a ( $E_d$ ) od 65,9 do 86,5 GPa, statyczny moduł Young'a ( $E$ ) od 22,3 do 45,2 GPa oraz współczynnik Poisson'a ( $\nu$ ) od 0,12 do 0,24. Natomiast dla iłowców ordowickich  $E_d$  wynosił od 66,4 do 89,7 GPa, a  $E$  był rzędu od 33,7 do 39,3 GPa. Z kolei współczynnik Poisson'a wynosił od 0,15 do 0,21.

Podwyższone wartości modułów Young'a i obniżone współczynniki Poisson'a dla skały ilasto-mułowcowej (tzw. łupek kruchy), charakteryzują strefy o potencjalnych zdolnościach do pękania i kruszenia się skały. W przypadku obecności minerałów ilastych powyżej 40% skała łupkowa charakteryzuje się wysokim stopniem plastyczności oraz niskim modułem Young'a i wysokim współczynnikiem Poisson'a (tzw. łupek plastyczny). Skały piaskowcowe są bardziej kruche. Ma to duże znaczenie przy projektowaniu zabiegów szczelinowania. Zwiększona plastyczność skały powoduje zmniejszenie zdolności skały do spękań i kruszenia, co w konsekwencji oznacza pogorszenie warunków przepływu gazu przez formację złożową, a tym samym eksploatacja z tego typu złóż staje się trudniejsza.

#### ***2.1.4. Warunki złożowe w wybranych formacjach złożowych***

W dostępnej literaturze brak jest jednoznacznych informacji o temperaturze złożowej, ciśnieniu złożowym, ciśnieniu porowym oraz o naprężeniach panujących w górotworze dla rozpatrywanych w rozprawie doktorskiej dwóch formacji złożowych.

Do określenia warunków złożowych panujących w górotworze, często stosuje się specjalistyczne próbniki temperaturowe i ciśnieniowe. Są one zapuszczane do odwiertu celem wykonywania pomiarów. Do obliczeń ciśnień złożowych oraz porowych wykorzystuje się także pomiary sejsmiczne (Wilk, 2016). W przypadku braku możliwości odwiercenia otworu i dennego pomiaru temperatury i ciśnienia złożowego, często do

obliczeń stosuje się wartości gradientów. Są one przyjmowane dla różnych obszarów geologicznych występowania złóż.

Do określenia temperatury złożowej stosowany jest gradient geotermiczny, równy 0,030 °C/1m. Odpowiada on średniej wartości stopnia geotermicznego w skali globalnej, równemu 33 m/1°C (<https://pl.wikipedia.org>, 2018).

Według Sobol (1980) na obszarze Niziu Polskiego gradient ciśnienia złożowego, waha się od 0,098 do 0,1225 MPa/10 m. Średnia wartość gradientu, wyliczona dla badanych utworów, wynosi 0,1098 MPa/10 m. Wartości te wzrastają w miarę zwiększania się głębokości. Największe ciśnienia złożowe występują na głębokościach przekraczających 5000 m. Powyższe informacje są zbieżne z danymi uzyskanymi z pomiarów dennych w otworach wiertniczych w czerwonym spągowcu, wykonanych przez PGNiG w strefie Kaleje – Zaniemyśl, (<https://pgnig.pl>, 2020). W otworach tych, na głębokości 3000 m zanotowano pierwotne ciśnienie złożowe, rzędu 34,5 MPa.

Dla Niziu Polskiego jest bardzo mało dostępnych danych dotyczących naprężeń tektonicznych, a w szczególności magnitud (wartości) naprężeń, które pozwalają ustalić właściwy reżim tektoniczny. Jarosiński (2005a, 2005b) i Gibowicz (1984) pokazali kierunki największych naprężeń poziomych  $\sigma_H$  z rejonów najbliższych dla wytypowanych otworów. W przypadku otworu Grochowice-3, zlokalizowanego w obrębie monokliny przedsudeckiej, Jarosiński (2005a), na podstawie wyników testów miniszczelinowania hydraulicznego ścian otworów wiertniczych, stwierdził obecność reżimu ekstensyjnego. Tym samym, do analiz Niziu Polskiego przyjmuje się najczęściej tego typu reżim.

Dla reżimu w którym dominuje naprężenie pionowe, szczelina tworzy się na wysokość w kierunku pionowym, a rozwartość w kierunku poziomym. Dla wszystkich reżimów, na rozwartość szczeliny działają naprężenia poziome  $\sigma_h$  (najniższe).

Do określenia wielkości minimalnego naprężenia poziomego  $\sigma_h$  działającego na szczelinę przyjmuje się gradient, rzędu 0,02035 MPa/m (tj. 0,90 psi/ft), (*źródło zastrzeżone dla ogólnodostępnej publikacji*).

## **2.2. Przegląd zagadnień związanych z metodą intensyfikacji wydobycia węglowodorów ze złóż niekonwencjonalnych**

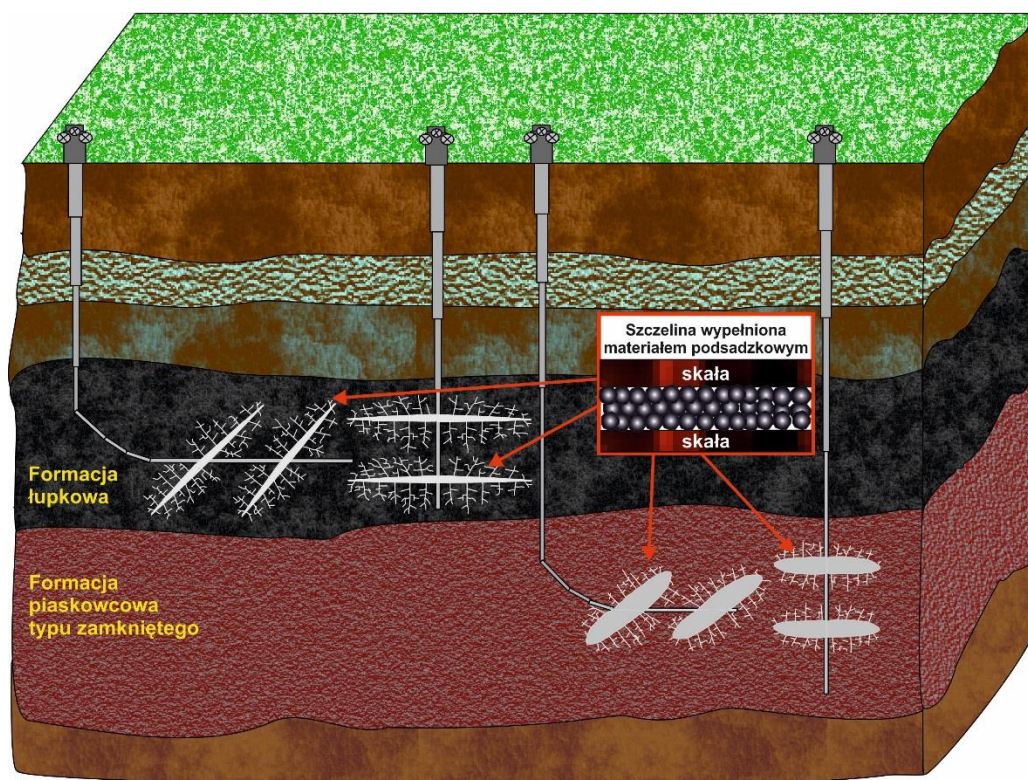
Właściwa eksploatacja złóż niekonwencjonalnych wymaga zastosowania zaawansowanych technik i technologii, umożliwiających wydobycie węglowodorów z jak najdalszej i największej części złoża (Czupski i in., 2013; Kasza, 2019; Reinicke i in., 2010; Terracina i in., 2010). Eksploatacja takich złóż najczęściej odbywa się przez odwierty poziome (horyzontalne), wielodenne ale również pionowe. Bardzo ważne jest tutaj szczegółowe rozpoznanie złoża oraz odpowiednie jego udostępnienie poprzez wykonanie wielu dużych zabiegów intensyfikacyjnych (Kasza 2011a; Naik 2003). Zabiegi stymulacji wydobycia w złożach niekonwencjonalnych wykonuje się już od lat osiemdziesiątych ubiegłego stulecia. Jednym z nich jest hydrauliczne szczelinowanie formacji złożowej. Projektowanie i przygotowanie takiego zabiegu jest bardzo złożonym procesem, bazującym na zebranych doświadczeniach, obserwacjach i pomiarach z wykonanych zabiegów i eksploatacji. Ważne jest w tym procesie między innymi właściwe rozpoznanie skały złożowej, warstw okalających, miąższości złoża, rozkładu naprężeń, warunków złożowych, rodzajów płynów złożowych. Istotne jest również minimalizowanie zjawisk niekorzystnie wpływających na efektywność wykonania zabiegu stymulacyjnego. Związane jest ono między innymi z efektywnością podsadzenia szczeliny dla uzyskania przepływu węglowodorów ze złoża do odwiertu.

### ***2.2.1. Charakterystyka zabiegu hydraulicznego szczelinowania***

Do stymulacji wydobycia węglowodorów ze złóż niekonwencjonalnych wykorzystuje się tzw. „duże” zabiegi hydraulicznego szczelinowania. Charakteryzują się one znacznie większą objętością cieczy technologicznej włączanej podczas zabiegu niż ma to miejsce w przypadku złóż konwencjonalnych. Dzięki temu uzyskuje się zwiększenie powierzchni kontaktu odwiertu ze złożem (Economides i Nolte, 1989; Gidley i in., 1989; Kasza, 2011a, 2011b; Naik 2003). Rezultatem tych działań jest połączenie odwiertu z odległymi partiami złoża przez powstałe i dobrze podsadzone materiałem podsadzkowym szczeliny, tworzące złożony system (Jennings i in., 1977, Shaoul i in., 2007).

Zabiegi hydraulicznego szczelinowania złóż węglowodorów wykonuje się w dwóch etapach. W pierwszym wykonuje się tzw. zabieg miniszczelinowania.

Jego zadaniem jego jest wstępne zainicjowanie szczelin na kontakcie odwiertu ze złożem. Natomiast w drugim etapie wykonuje się tzw. zabieg główny. Zadaniem tego zabiegu jest otwarcie, propagacja szczeliny oraz wypełnienie jej materiałem podsadzkowym, tak aby uzyskać wysoką jej przewodność (Kasza, 2011a). Ta faza szczelinowania wykonywana jest etapowo, przy zwiększeniu koncentracji podsadzki w płynie szczelinującym, w każdym z etapów. Podczas tłoczenia płynu szczelinującego do skały złożowej, ucieka on w obręb propagującej się szczeliny, co powoduje utrzymywanie się ciśnienia na względnie stałym poziomie ciśnienia propagacji szczeliny (Jarosiński, 2005a). Pionowe pęknięcia hydrauliczne rozwija się prostopadle względem kierunku oddziaływania najmniejszego naprężenia poziomego. Ideę tworzenia szczelin i spękań podczas szczelinowania złóż niekonwencjonalnych przedstawili na rysunku 2.12 między innymi: Masłowski i in. (2019), Masłowski (2020).

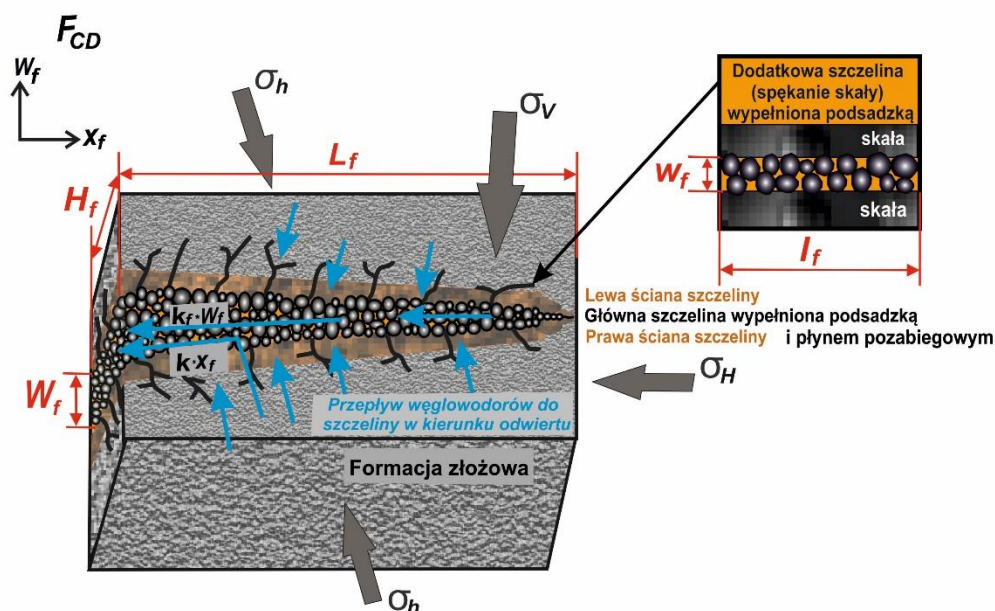


**Rys. 2.12** Uproszczony schemat powstawania szczelin i spękań w złożach niekonwencjonalnych (Masłowski i in., 2019; zmienione)

Podczas zabiegu szczelinowania jednym z ważniejszych parametrów jest ciśnienie netto  $P_{net}$ , stanowiące różnicę pomiędzy dennym ciśnieniem dynamicznym w trakcie zabiegu a ciśnieniem zamknięcia szczeliny (Allen i Roberts, 1993; Kasza, 2011b). Wzrost ciśnienia netto w trakcie trwania szczelinowania formacji łupkowych, zazwyczaj świadczy o powstawaniu szczeliny o skomplikowanej geometrii. Powstałe szczeliny wypełnia się



materiałem podsadzkowym, co zapobiega całkowitemu ich zamknięciu, gdy ciśnienie w niej spadnie poniżej ciśnienia zamknięcia szczeliny, po wykonanym zabiegu. Wartość ciśnienia zamknięcia szczeliny pionowej jest równa wielkości minimalnego naprężenia poziomego  $\sigma_h$  (Jarosiński, 2005a). Dzięki takiemu wytworzeniu i podsadzeniu szczeliny, uzyskuje się przepływ węglowodorów ze złoża do odwiertu, (Rys. 2.13).



**Rys. 2.13** Uproszczony schemat przepływu węglowodorów ze złoża do odwiertu, po wykonanym zabiegu hydraulicznego szczelinowania, gdzie:  $F_{CD}$  – bezwymiarowa przewodność szczeliny (Argawal i in., 1979),  $k_f$  – przepuszczalność szczeliny,  $W_f$  – rozwartość szczeliny,  $k$  – przepuszczalność skały,  $H_f$  – wysokość szczeliny,  $x_f$  – połowa długości głównej szczeliny  $L_f$ ,  $w_f$  – rozwartość dodatkowo powstałych spękań (szczelin),  $l_f$  – długość dodatkowo powstałych szczelin (spękań),  $\sigma$  – naprężenie ściskające szczelinę (pochodzące od górotworu),  $\sigma_h$  – minimalne naprężenie poziome,  $\sigma_H$  – maksymalne naprężenie poziome,  $\sigma_V$  – naprężenie pionowe (pochodzące od nadkładu)

Przy podsadzaniu szczelin w trakcie wykonywania zabiegu hydraulicznego szczelinowania złóż węglowodorów, materiał podsadzkowy może układać się na trzy różne sposoby (Kasza, 2011a; Palish i in., 2008):

- wielowarstwowo (jak przy klasycznym szczelinowaniu),
- może być zawieszony oraz blokowany w przewężeniach szczelin i mikroszczelin,
- jednowarstwowo.

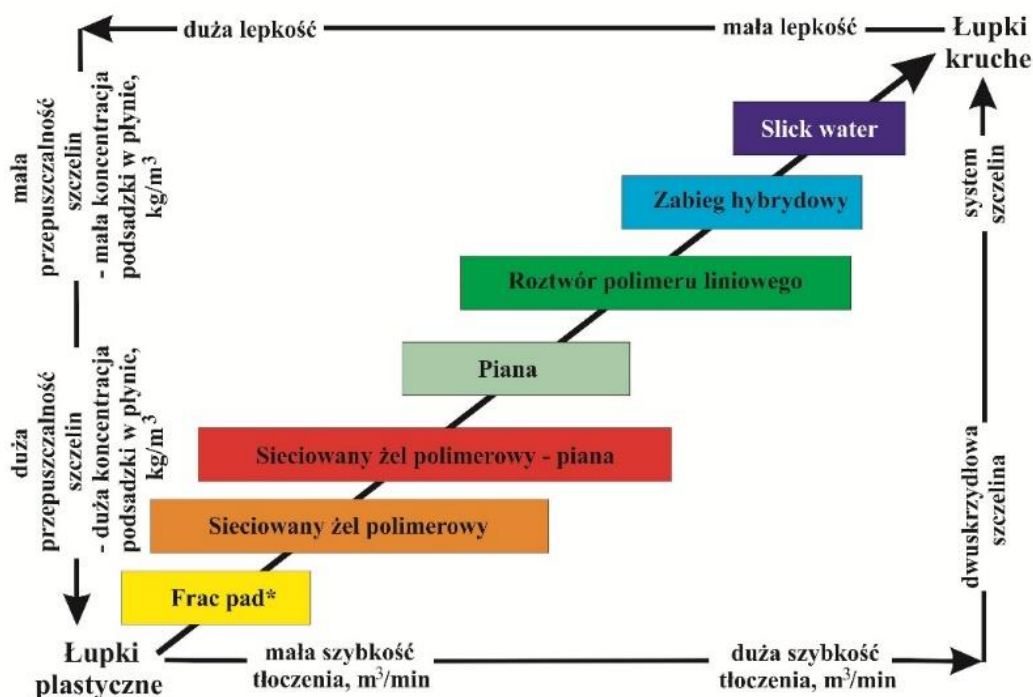
Jako skałę perspektywiczną do wykonania zabiegu szczelinowania, uważa się skałę, która w swoim składzie mineralnym nie zawiera więcej niż 40% minerałów ilastych, statyczny moduł Young'a jest większy niż 24,1 GPa, z kolei stosunek dynamicznego do statycznego modułu Young'a zbliża się do wartości charakterystycznych dla skał klastycznych (Kasza 2013). Praktyka przemysłowa dopuszcza także wykonywanie

zabiegów szczelinowania skał charakteryzujących się zawartością minerałów ilastych powyżej 40%. Jednak wówczas wymagane jest zastosowanie odpowiednich technologii szczelinowania tego rodzaju skał.

W celu doboru technologii szczelinowania skały zbiornikowej, w zależności od jej właściwości geomechanicznych, stosuje się różne schematy, które zaproponowali Rickman i in. (2008), (Rys. 2.14) oraz Chong i in. (2010), (Rys. 2.15).

Wskaźnik kruchości (podatność na szczelinowanie)	System płynu	Geometria szczeliny	Profil zamknięcia szczeliny (rozwartość)	Koncentracja podsadzki	Objętość płynu	Ilość podsadzki
70 %	slick water			mała	duża	mała
60 %	slick water			↓	↑	↓
50 %	hybryda					
40 %	liniowy					
30 %	piana lub sieciowany			↓	↑	↓
20 %	sieciovany					
10 %	sieciovany			duża	mała	duża

Rys. 2.14 Schemat doboru technologii szczelinowania, w zależności od wskaźnika kruchości (*BRITT*), z ang. Brittleness (Rickmana i in, 2008)



\* metoda hydraulicznego szczelinowania połączona z wykonaniem obsybk

Rys. 2.15 Schemat doboru technologii szczelinowania, w zależności od właściwości mechanicznych skały łupkowej (Chong i in., 2010)



Zabiegi hydraulicznego szczelinowania piaskowców typu zamkniętego są podobne do zabiegów wykonywanych w złożach konwencjonalnych. Stosuje się tutaj technologie sieciowanych żelów polimerowych o koncentracji polimeru od 2,4 kg/m<sup>3</sup> do 4,8 kg/m<sup>3</sup> (Czupski i in., 2013) lub roztworów polimerów liniowych o wysokiej koncentracji polimeru.

W przypadku szczelinowania skał ilasto-mułowcowych o wysokiej plastyczności (tzw. łupków plastycznych), zabiegi są podobne do tych wykonywanych dla piaskowców typu zamkniętego. Stosuje się tutaj zarówno technologie sieciowanych żeli polimerowych, jak i technologie roztworów polimerów liniowych. Z kolei do szczelinowania skał ilasto-mułowcowych, charakteryzujących się niskim stopniem plastyczności (tzw. łupki kruche), stosuje się najczęściej technologie *slick water*, tj. woda z niewielką ilością polimeru, o bardzo niskiej lepkości (Chong i in., 2010; Czupski i in., 2013; Kasza, 2011a, 2019). Koncentracja polimeru w takich płynach jest około czterokrotnie niższa niż w przypadku sieciowanych żeli polimerowych (Czupski i in., 2013).

Do zabiegów szczelinowania złóż niekonwencjonalnych, w uzasadnionych przypadkach stosuje się również płyny energetyzowane i piany (Czupski i in., 2013; Grundmann i Lord, 1983; Wilk, 2019; Wilk i in., 2015; Wilk i in., 2021; Wilk i Kasza, 2016). Wykorzystuje się je głównie dla złóż charakteryzujących się niskim ciśnieniem złożowym, oraz dla skał złożowych szczególnie wrażliwych na oddziaływanie wody (duża zawartość minerałów ilastych podatnych na migrację i pęcznienie).

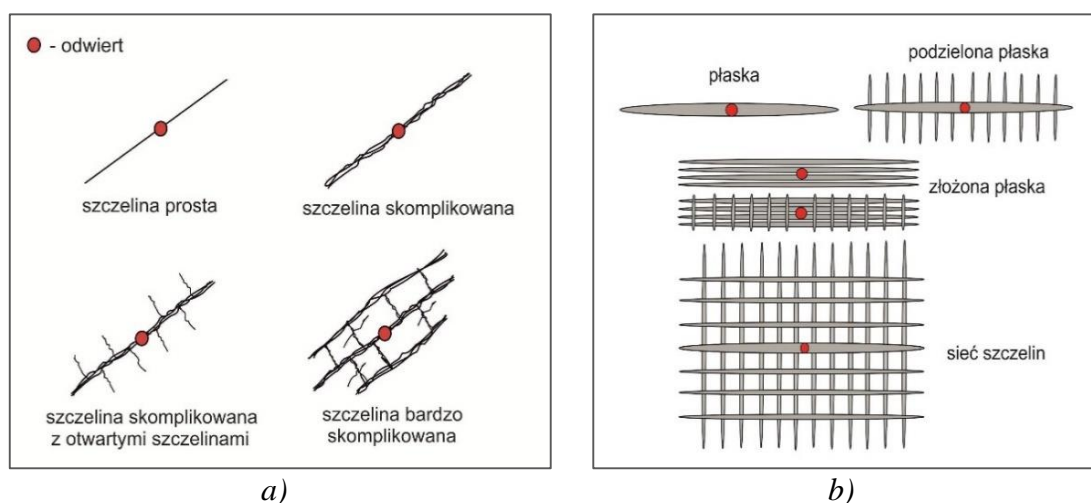
Podczas wykonywania zabiegu hydraulicznego szczelinowania złóż bardzo ważne jest również właściwe zatłoczenie materiału podsadzkowego. Ma on za zadanie zabezpieczyć szczelinę przed całkowitym jej zamknięciem. Zapewnia to uzyskanie właściwej jej przewodności dla przepływu węglowodorów. W przypadku hydraulicznego szczelinowania skał piaskowcowych typu zamkniętego, najczęściej stosuje się podsadzki o granulacji ziaren od 0,600 do 0,300 mm (tj. 30÷50 mesh) lub od 0,850 do 0,425 mm (tj. 20÷40 mesh). Z kolei dla łupków kruchych najczęściej stosuje się podsadzki o granulacji ziaren od 0,425 do 0,212 mm (tj. 40÷70 mesh) lub od 0,600 do 0,300 mm. Natomiast dla łupków plastycznych stosowane są podsadzki o granulacji ziaren od 0,600 do 0,300 mm lub od 0,850 do 0,425 mm.

Należy tutaj zaznaczyć, że zabiegi hydraulicznego szczelinowania złóż niekonwencjonalnych wymagają wytworzenia licznych szczelin i pęknięć w skale celem umożliwienia ich eksploatacji. Dlatego bardzo ważną rolę odgrywa wygenerowanie

w skale złożowej rozbudowanego systemu szczelin poprzez zatłoczenie do złoża bardzo dużej ilości płynu szczelinującego oraz materiału podsadzkowego.

Na przebieg procesu hydraulicznego szczelinowania wpływ ma aktualny stan naprężeń w górotworze. Według Economidesa i Nolte (1989) oraz Gidley i in. (1989), podczas zabiegu hydraulicznego szczelinowania złóż węglowodorów propagacja szczeliny odbywa się w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku minimalnych naprężeń poziomych występujących w złożu.

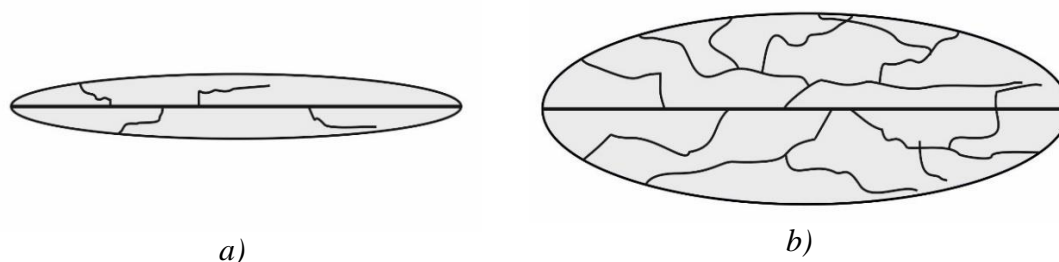
W przypadku złóż konwencjonalnych tworzą się szczelina dwuskrzydłowa, która opisywana jest różnymi modelami. Do podstawowych, klasycznych modeli szczeliny zalicza się modele 2D: KGD (Khristianowic-Geertsma de Klerk), PKN (Parkins-Kern-Nordgren) i Radialny (Economides i Nolte, 1989). Występują również bardziej skomplikowane modele numeryczne, które zakładają zmienność wszystkich parametrów w przestrzeni 3D i w czasie. Podczas hydraulicznego szczelinowania złóż niekonwencjonalnych tworzy się skomplikowany system szczelin (Cipolla i in., 2008; King, 2010; Kasza, 2011a). Stopień skomplikowania szczelin oraz teoretyczną koncepcję tworzenia struktury szczelin przedstawia rysunek 2.16.



**Rys. 2.16** Schemat: a) stopnia skomplikowania szczelin; b) teoretycznej koncepcji tworzenia struktury szczelin, powstałych po zabiegu hydraulicznego szczelinowania złóż węglowodorów (Cipolla i in., 2008; King, 2010; zmienione)

Sieć szczelin pozwala na uzyskanie dużej powierzchni kontaktu złoża z odwiertem, co umożliwia jego ekonomiczną eksploatację. Geometria takich szczelin jest bardzo złożona i zależna od obszarów zdolnych do pęknięcia. Odgrywa to ważną rolę w rozwoju sieci szczelin wystarczająco rozległych, aby objąć jak największą objętość skały i połączyć je z odwiertem w procesie hydraulicznego szczelinowania. Różnice w tworzących się

systemie szczelin w skałach o właściwościach plastycznych (Rys. 2.17a) i kruchych (Rys. 2.17b) przedstawia rysunek 2.17.



**Rys. 2.17** Geometria szczelin tworzonych w formacjach skalnych o: a) małej oraz b) dużej zdolności do szczelinowania (pęknięcia) (Chong i in., 2010; zmienione)

### 2.2.2. Rodzaje płynów szczelinujących

Najczęściej do zabiegów hydraulicznego szczelinowania złóż niekonwencjonalnych stosuje się płyny szczelinujące na bazie wody (Chong i in., 2010; Czupski i in., 2013; Grundmann i Lord, 1983; Kasza, 2019; Wilk i in., 2015; Wilk i in., 2021):

- syntetyczne polimery o bardzo niskiej lepkości, rzędu kilku  $mPa\cdot s$ , (ang. *slick water*),
- naturalne polimery liniowe o lepkości, od kilkudziesięciu do kilkuset  $mPa\cdot s$ ,
- naturalne sieciowane polimery liniowe o lepkości od kilkuset do kilku tysięcy  $mPa\cdot s$ ,
- płyny spienione o lepkości od kilkudziesięciu do kilku tysięcy  $mPa\cdot s$ ,
- płyny na bazie surfaktantów o lepkości od kilkudziesięciu do kilku tysięcy  $mPa\cdot s$ , (ang. *VES Fluid – Viscoelastic Surfactant Fluids*).

Oprócz wyżej wymienionych płynów szczelinujących, stosuje się również niekonwencjonalne rozwiązania technologiczne tj. dwutlenek węgla  $CO_2$  w fazie ciekłej, sprężony azot  $N_2$  lub gaz płynny LPG. Użycie takich płynów przeznaczone jest do złóż charakteryzujących się bardzo niskim ciśnieniem złożowym, bardzo małą przepuszczalnością oraz skał zawierających w swoim składzie znaczną ilość minerałów ilastych podatnych na migrację i pęcznienie w kontakcie z wodą.

Głównym składnikiem płynów szczelinujących jest woda (99%) oraz następujące dodatki budujące ich lepkość, (Economides i Nolte, 1989; Kasza, 2019):

- naturalny polimer (np. guar i jego pochodne, tj. HPG – hydroksypropyloguar i CMHPG – karboksymetylo hydroksypropylo guar oraz pochodne celulozy, takie

jak HEC – hydroksyetyloceluloza i CMHEC – karboksymetylohydroksyetyloceluloza lub guma ksantanowa),

- syntetyczny polimer (np. poliakryloamid, akryloamid),
- surfaktanty (np. anionowe, kationowe, amfoteryczne).

W celu zwiększenia lepkości wodnych roztworów polimerów liniowych stosowane są środki sieciujące. Są to najczęściej sole boru, tytanu lub cyrkonu (Economides i Nolte, 1989). Nie mniej ważne niż budowanie lepkości do wykonania szczeliny jest również jego upłynnienie po wykonanym zabiegu celem lepszego oczyszczenia szczelin. Odbywa się to poprzez dodanie do płynu łamaczy utleniających lub enzymatycznych.

Oprócz wyżej wymienionych składników płynu szczelinującego, dodaje się do niego również: bufory pH, środki bakteriobójcze (biocydy), stabilizatory termiczne, stabilizatory minerałów ilastych, inhibitory wytrącania się osadów nieorganicznych, środki powierzchniowo czynne, środki kontrolujące filtrację płynu zabiegowego do skały złożowej (Economides i Nolte, 1989; Kasza, 2019; Kelland, 2014).

Prawidłowo przygotowany płyn do hydraulicznego szczelinowania powinien spełniać następujące zadania (Cipolla i in., 2008; Chong i in., 2010; Economides i Nolte, 1989; Rickman i in., 2008):

- powodować otwarcie i propagację szczeliny,
- zapewniać dobre własności transportowe materiału podsadzkowego z powierzchni przez armaturę otworową do szczeliny,
- minimalizować uszkodzenie skały zbiornikowej oraz warstwy materiału podsadzkowego,
- być łatwy do odbioru po wykonaniu zabiegu.

Aby płyn szczelinujący mógł spełniać powyższe zadania, powinien mieć odpowiednią charakterystykę reologiczną, mieć niskie opory przepływu, charakteryzować się niską filtracją w skałę złożową, być kompatybilny ze złożem i płynami złożowymi, powodować minimalne uszkodzenia hydroprzewodności szczeliny wypełnionej podsadzką oraz przepuszczalności skały, zmniejszać swą lepkość i być łatwy do usunięcia ze szczeliny po zakończeniu zabiegu szczelinowania, a także być łatwy do wykonania w warunkach terenowych i ekonomiczny w stosowaniu (Cipolla i in., 2008; Chong i in., 2010; Czupski i in., 2013; Economides i Nolte, 1989; Kasza, 2019; Rickman i in., 2008).

### 2.2.3. Rodzaje materiałów podsadzkowych

Dla zabezpieczenia przed całkowitym zaciśnięciem się wytworzonej szczeliny po zakończonym zabiegu stosuje się różne rodzaje materiałów podsadzkowych. Zalicza się do nich między innymi (Economides i Nolte, 1989; Fuss i in., 2014; Liang i in., 2016; Kasza, 2019; Masłowski, 2014; Masłowski i Czupski, 2014; Terracina i in., 2010):

- piasek kwarcowy,
- piasek kwarcowy pokryty żywicą – RCS (ang. *Resin Coated Sand*),
- ultralekką podsadzkę ceramiczną – ULCP (ang. *Ultra Light Ceramic Proppants*),
- lekką podsadzkę ceramiczną – LCP (ang. *Light Ceramic Proppants*),
- podsadzki ceramiczne o średniej wytrzymałości – ISP (ang. *Inter Strenght Proppants*),
- podsadzkę o wysokiej wytrzymałości – tlenek cyrkonu, spieki boksytowe, HSP (ang. *Hight Strenght Proppants*),
- podsadzkę ceramiczną pokrytą żywicą – RCCP (ang. *Resin Coated Ceramic Proppants*).

Najczęściej stosowanym materiałem podsadzkowym do zabiegów hydraulicznego szczelinowania jest odpowiednio przygotowany i sprawdzony naturalny piasek kwarcowy. Głównym jego składnikiem jest krzemionka (kwarc)  $\text{SiO}_2$ , stanowiąca od 80% do 99,8% podsadzki. Stosowane są one do podsadzenia szczeliny przy naprężeniach ściskających nie przekraczających wartości 41,4 MPa (Economides i Nolte, 1989).

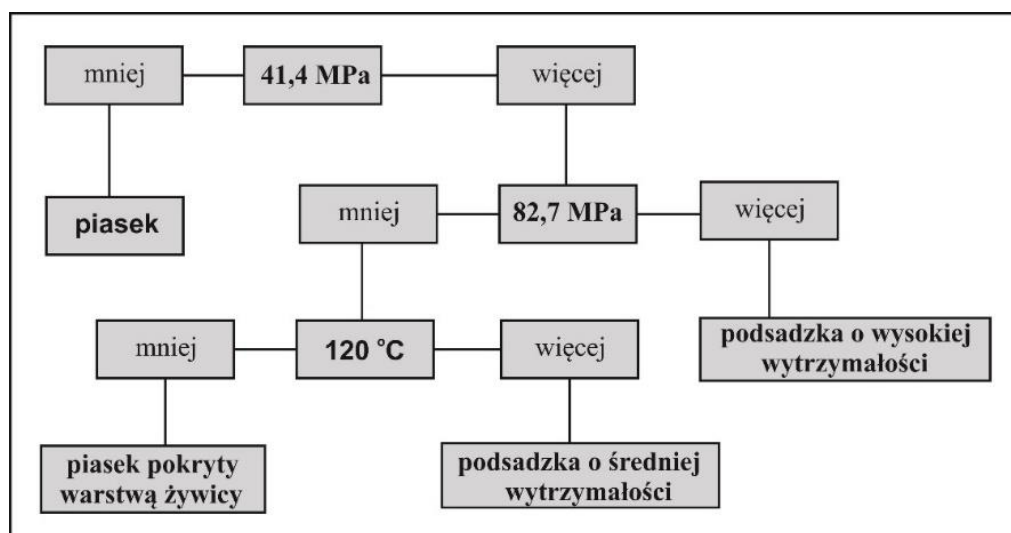
Następną grupę materiałów podsadzkowych stanowi piasek kwarcowy pokryty żywicą (Sullivan i in., 2006). Do jego wykonania wykorzystuje się podsadzkę kwarcową oraz stosuje się różne rodzaje żywicy, ilość warstw żywicy nałożonych na ziarna, a także różne metody żywicowania. Piasek żywicowany ma szerszy zakres wytrzymałości w stosunku do piasku kwarcowego nie pokrytego żywicą. Uzyskuje się również polepszenie kształtu ziaren piasku. Taki rodzaj podsadzek, stosuje się głównie w celu zapobiegania wymywania ziaren podsadzki ze szczeliny w wyniku przepływu węglowodorów (ang. *flowback*).

Do grupy podsadzek syntetycznych o najmniejszej gęstości wlicza się porowate materiały podsadzkowe. Ich porowata struktura zapewnia dodatkowe kanały przepływu dla gazu. Kolejnymi ultralekkimi podsadzkami z tej grupy są materiały termoplastyczne (King, 2010; Parker i in., 2012), które zmieniają swój kształt pod wpływem naprężeń i temperatury, stając się bardziej odporne na naprężenia ściskające. Występują również

szklane materiały podsadzkowe, charakteryzujące się wysoką sferycznością i brakiem porowatości. Wymienione ultralekkie materiały cechuje znacznie niższa wytrzymałość na naprężenia ściskające, niż podsadzki kwarcowe.

Do grupy podsadzek syntetycznych wlicza się także podsadzki ceramiczne o różnej zawartości tlenku glinu  $Al_2O_3$ . Najmniejszą zawartość tlenku glinu posiadają ultralekkie podsadzki ceramiczne. Są też mało odporne na ściskanie, podobnie do podsadzki kwarcowej. W przypadku naprężeń ściskających, rzędu od 41,4 MPa do 69,0 MPa, do podsadzenia szczeliny stosuje się lekką podsadzkę ceramiczną. Z kolei, podsadzki ceramiczne o średniej wytrzymałości na ściskanie, stosowane są przy naprężeniu, od 69,0 MPa do 82,7 MPa. Podsadzki ceramiczne o bardzo wysokiej wytrzymałości na ściskanie (powyżej 82,7 MPa), to między innymi spieki boksytu, tlenek cyrkonu, itp. W celu zwiększenia wytrzymałości podsadzki ceramicznej oraz zapobiegania niekorzystnemu zjawisku wymywania jej ziaren ze szczeliny, dodatkowo jej ziarna pokrywa się warstwą żywicy. Sposób ich żywicowania jest podobny jak w przypadku wcześniej opisanych żywicowanych piasków.

Ogólną klasyfikację zastosowania materiałów podsadzkowych, uwzględniającą wielkości naprężeń ściskających oraz temperaturę, zaproponowali Economides i Nolte w 1989 roku, (Rys. 2.18).



**Rys. 2.18** Graficzne przedstawienie klasyfikacji zastosowania materiałów podsadzkowych, z uwzględnieniem naprężeń ściskających oraz temperatury (Economides i Nolte, 1989)

Według literatury (Alramahi i Sundberg, 2012; Liang i in., 2016; Kasza, 2019; Masłowski, 2014, 2016; Masłowski i Czupski, 2014), prawidłowo dobrany materiał podsadzkowy do zabiegu hydraulicznego szczelinowania, powinien posiadać:

- obojętność chemiczną,
- jednorodny rozkład uziarnienia,
- niski ciężar właściwy,
- odpowiednio wysoką kulistość i krągłość ziaren (sferyczność),
- niską zawartość zanieczyszczeń,
- niską rozpuszczalność w mieszaninie kwasów,
- odpowiednio wysoką wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie,
- małą podatność na zjawisko wymywania ziaren podsadzki ze szczeliny,
- nie ulegać zjawisku wgniatania ziaren w skałę złożową,
- zapewniać odpowiednią przewodność i przepuszczalność wytworzonym w złożu szczelinom,
- być łatwo dostępny oraz ekonomiczny w produkcji.

Dobór materiału podsadzkowego do zabiegu uzależniony jest również od:

- rodzaju płynu szczelinującego (transportującego podsadzkę z powierzchni otworu do szczeliny),
- wartości naprężeń ściskających skałę (pochodzących od górotworu),
- temperatury złożowej,
- podatności skały na zjawisko wgniatania w nią ziaren podsadzki.

#### ***2.2.4. Zjawiska negatywnie wpływające na efektywność podsadzenia szczeliny***

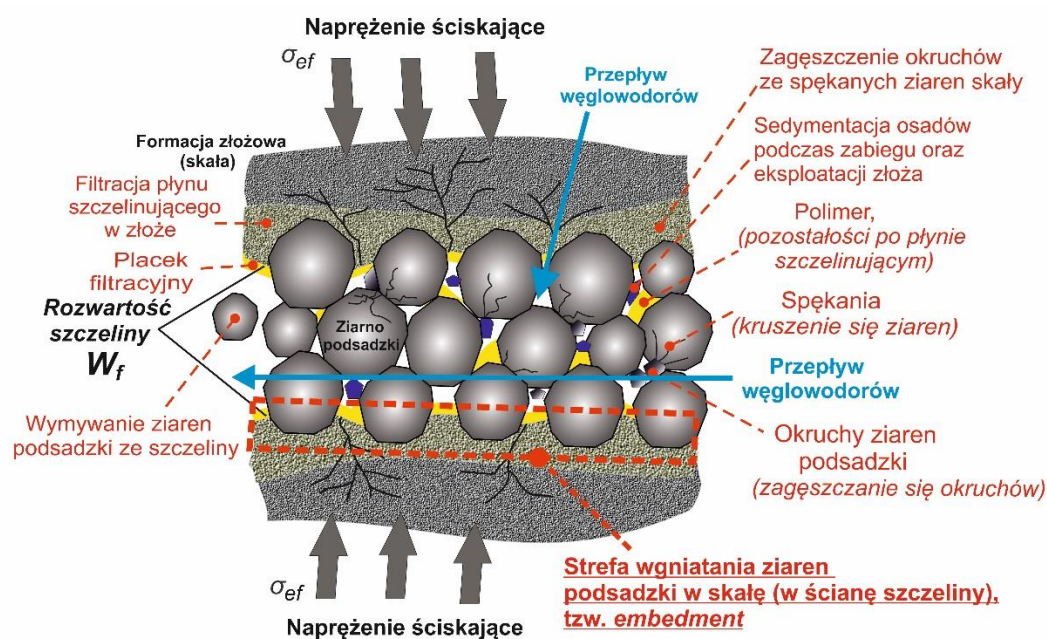
Efektywność wykonania zabiegu hydraulicznego szczelinowania złoża zależna jest między innymi od transportu i umieszczenia materiału podsadzkowego w szczelinie a także od efektywności podsadzenia szczeliny (Economides i Nolte, 1989; Kasza, 2019; Masłowski i in., 2019; Reinicke i in., 2006; Reinicke i in., 2010).

Do zjawisk niekorzystnie wpływających na efektywność podsadzenia szczeliny zalicza się między innymi:

- wgniatanie ziaren podsadzki w skałę (ang. *embedment*),
- wycisk materiału skalnego z wgniecień ziaren podsadzki na powierzchni skały,

- reorientacja ziaren podsadzki w szczelinie,
- zagęszczanie się okruchów ze spękanych ziaren podsadzki wywołanych występującymi naprężeniami ściskającymi oraz temperaturą w złożu,
- migrację i wymywanie ziaren podsadzki ze szczeliny podczas powrotu płynu szczelinującego do odwiertu (ang. *flowback*).

Niekorzystne zjawiska występujące w szczelinie, zostały przedstawione graficznie na rysunku 2.19 przez Legarth (2003), Legarth i in. (2005), Masłowski i in. (2018b, 2019) oraz Reinicke i in. (2006, 2010).



**Rys. 2.19** Niekorzystne zjawiska występujące w szczelinie, w trakcie oraz po zakończeniu zabiegu hydraulicznego szczelinowania złoża węglowodorów, gdzie  $\sigma_{ef}$  – naprężenie efektywne (Legarth, 2003; zmienione)

Zjawiska te występują zarówno w trakcie wykonywania zabiegu oraz po jego zakończeniu. Związane są z obecnością płynów zabiegowych, płynów złożowych oraz oddziaływaniem naprężeń.

Podczas szczelinowania obserwuje się również zjawisko filtracji płynu w skałę złożową poprzez ściany szczeliny. Wskutek tego dochodzi do przepływu części płynu do przestrzeni porowej skały, natomiast w okolicach ścian szczeliny zwiększa się koncentracja polimeru (tzw. placek filtracyjny). Następuje wówczas wytworzenie się strefy związanej z plackiem filtracyjnym o różnej grubości oraz strefy zajętej przez filtrat (Czupski, 2012; Economides i Nolte, 1989). Grubość placka filtracyjnego tworzącego się na powierzchni skały zależy od składu płynu, szybkości ścinania w szczelinie oraz czasu



filtracji. Z kolei ilość filtratu znajdującego się w drugiej strefie skały zależy od jej właściwości petrofizycznych, czasu filtracji, jak również od pierwotnego składu płynu szczelinującego. Oba te niekorzystne zjawiska wpływają na zmniejszenie się przepuszczalności i przewodności formacji złożowej w obrębie ściany szczeliny. Placek filtracyjny i pozostałości polimerowe z płynu po zabiegu dodatkowo ograniczają w znacznym stopniu przewodność szczeliny (warstwy podsadzki). Obecność filtratu w skale złożowej przyczynia się do podwyższenia jej właściwości plastycznych. Sprzyja to zwiększeniu się negatywnego procesu wgniatania ziaren podsadzki w skałę.

Gdy po zakończonym szczelinowaniu, ciśnienie tłoczenia płynu zabiegowego spadnie poniżej wartości ciśnienia szczelinowania, zaczynają dominować naprężenia ściskające powodując zamykanie szczeliny i zmniejszanie jej rozwartości, co również wpływa na efektywność zabiegu.

Należy tutaj zaznaczyć, że przed doborem właściwej technologii hydraulicznego szczelinowania złóż węglowodorów ważne jest zbadanie oraz ograniczenie występowania zjawisk negatywnie wpływających na efektywność wykonania zabiegu stymulacyjnego, co bezpośrednio przekłada się na poprawę wydobycia węglowodorów ze złoża.

### **2.3. Przegląd zagadnień związanych z analizą zjawiska wgniatania ziaren materiału podsadzkowego w skałę złożową oraz jego wpływ na efektywność podsadzenia szczeliny**

Od wielu lat podejmuje się szereg prób analizy zjawiska wgniatania materiału podsadzkowego w skałę złożową oraz jego wpływu na efektywność podsadzenia szczeliny wytworzonej w wyniku zabiegu hydraulicznego szczelinowania złoża (Bandara i in., 2019). Obejmowały one różne metody badań oraz modelowania numeryczne zjawiska embedmentu dla określenia efektywności podsadzenia szczeliny. Dotyczyły one między innymi uszkodzeń:

- powierzchni skały w obrębie ściany szczeliny,
- przepuszczalności i porowatości skały w obrębie ściany szczeliny,
- rozwartości szczeliny wypełnionej podsadzką,
- przepuszczalności i przewodności szczeliny wypełnionej podsadzką,

oraz określenia liczby warstw ziaren podsadzki wypełniających szczelinę.

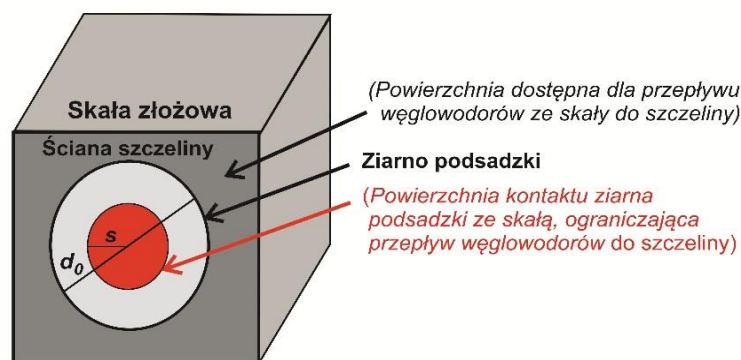
### 2.3.1. Charakterystyka zjawiska embedmentu

Zjawisko wgniatania ziaren podsadzki w skałę złożową (tzw. *embedment*) uwidacznia się w obrębie ściany szczeliny, po zakończeniu zabiegu hydraulicznego szczelinowania (Reinicke i in., 2006). Ma to miejsce, gdy ciśnienie w szczelinie spadnie poniżej wartości ciśnienia zamknięcia. Zaciśnięcie się szczeliny przyczynia się do kruszenia ziaren skały złożowej i zagęszczania się tych okruchów w obrębie ściany szczeliny. Na skutek tego dochodzi do ograniczenia przestrzeni porowej skały dostępnej dla efektywnego przepływu uwolnionych węglowodorów w skale. Zostało to zobrazowane na rysunku 2.20 przez Legarth i in. (2005), Reinicke i in. (2006) oraz Masłowski (2015).



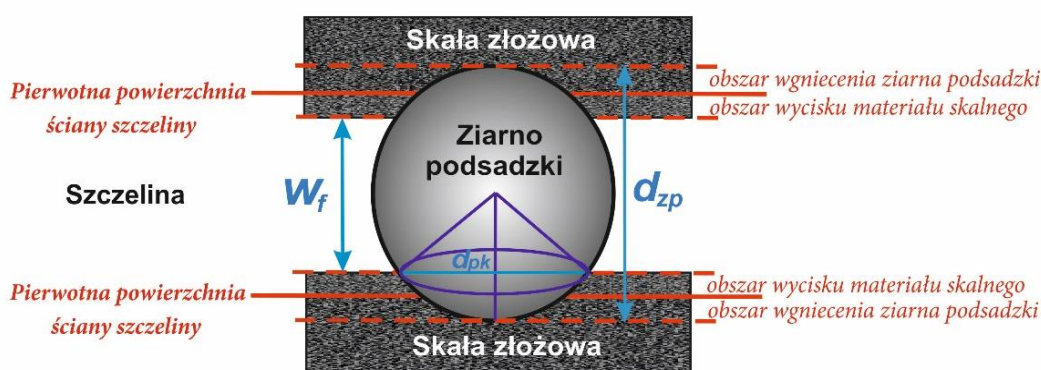
**Rys. 2.20** Wpływ zjawiska embedmentu na wielkość przepływu węglowodorów w skale, w obrębie ściany szczeliny (Legarth i in., 2005; zmienione)

W wyniku stałego przylegania ziarna podsadzki do powierzchni skały (ściany szczeliny) ograniczona zostaje powierzchnia dostępu do przepływu węglowodorów ze złoża do szczeliny oraz rozwartość szczeliny. Ideę modelu uszkodzenia powierzchni skały przez idealnie okrągłe ziarno podsadzki pokazano na rysunku 2.21.



**Rys. 2.21** Geometryczny model uszkodzenia powierzchni ściany szczeliny przez ziarno podsadzki, gdzie:  $d_0$  – średnica ziarna podsadzki,  $s$  – promień obszaru kontaktu ziarna podsadzki ze skałą

Z kolei geometryczny model wpływu zjawiska wgniatania okrągłego ziarna podsadzki w ścianę szczeliny na jej rozwartość przedstawili Volk i in., (1981). Dla dokładniejszego przybliżenia idei modelu zjawiska wgniatania ziarna podsadzki w skałę złożową wydzieliła się dwa obszary (Masłowski, 2020; Masłowski i Labus, 2021). Pierwszy z nich dotyczy wgniecenia ziarna podsadzki w pierwotną powierzchnię ściany szczeliny, z kolei drugi dotyczy wycisku materiału skalnego na jej powierzchni. Zostały one przedstawione na rysunku 2.22 przez Volka i in. (1981), Masłowskiego (2020) oraz Masłowskiego i Labus (2021).



**Rys. 2.22** Dokładniejszy model geometryczny zjawiska wgniatania ziarna podsadzki w ścianę szczeliny, gdzie:  $W_f$  – rozwartość szczeliny z podsadzką,  $d_{zp}$  – średnica ziarna podsadzki,  $d_{pk}$  – średnica obszaru kontaktu podsadzki ze skałą (Volk i in., 1981; zmienione)

Przed zaciśnięciem się wytworzonej szczeliny, pierwotna jej rozwartość była wystarczająca do wtłoczenia podsadzki w taką szczelinę.

Natomiast zredukowana maksymalna rozwartość  $W_f$  wpływa na spadek efektywnego przepływu węglowodorów przez warstwę podsadzki. Uwidacznia się on w szczególności w przypadku podsadzenia szczeliny jedną warstwą ziaren podsadzki, charakteryzujących się małą średnicą.

Wykonane dotychczas badania, modelowania oraz analizy przez Alramahi i Sunberg (2012), Bandara i in. (2019), Chen i in. (2018), Ghassemi i Suarez-Rivera (2012a), Liu i inni (2018), Masłowski (2015, 2019, 2020), Masłowski i Biały (2016), Masłowski i Czupski (2014), Masłowski i Labus (2021), Masłowski i in. (2016, 2018b, 2019, 2021), Mueller i Amro (2015), Reinicke i in. (2006, 2010), Suarez-Rivera i in. (2013), Terracina i in. (2010), Volk i in. (1981), wykazały, że na wielkość zjawiska embedmentu wpływają między innymi:

- skład mineralny skały,
- właściwości geomechaniczne skały złożowej (tj. moduł Young'a i współczynnik Poisson'a),

- rodzaj i rozmiar ziaren materiału podsadzkowego,
- sferyczny kształt ziaren podsadzki,
- wielkość naprężeń ściskających szczelinę z podsadzką,
- czas oddziaływania naprężeń ściskających szczelinę,
- rodzaj płynów zabiegowych i złożowych,
- temperatura,
- sposób eksploatacji złoża.

### 2.3.2. Wpływ zjawiska *embedmentu* na efektywność podsadzenia szczeliny

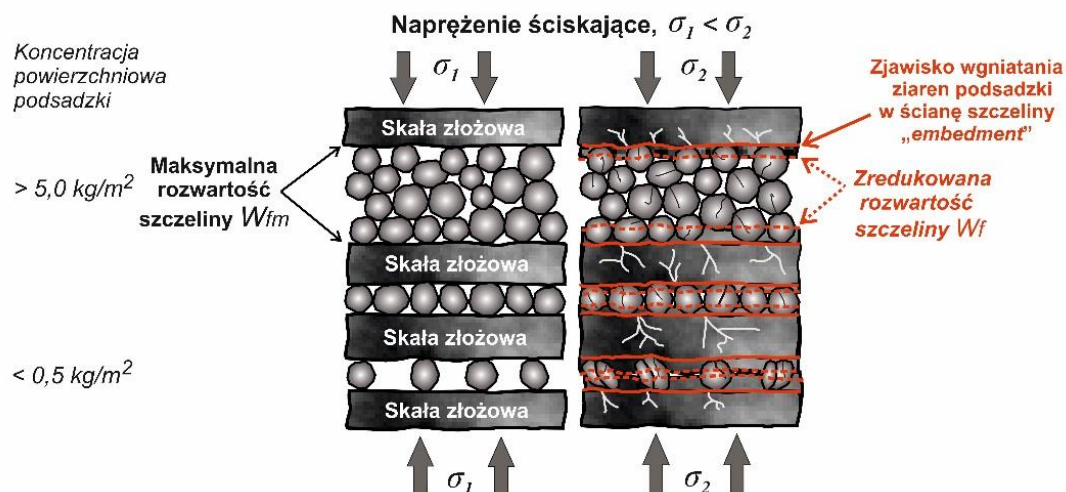
Efektywność podsadzenia szczeliny związana jest z uzyskaniem odpowiedniego przepływu węglowodorów ze złoża do odwiertu. Jej wielkość zależna jest między innymi od niekorzystnego zjawiska jakim jest *embedment*. Związane jest to z głębokością i średnicą wgnieceń ziaren podsadzki w ścianę szczeliny. Średnica wgnieceń wpływa na wielkość przepływu węglowodorów ze skały do szczeliny, a następnie poprzez szczelinę do odwiertu. Uszkodzenie powierzchni ściany szczeliny w miejscach kontaktu jej z ziarnami podsadzki ogranicza dostęp dla przepływu węglowodorów co pokazano na rysunku 2.23.



**Rys. 2.23** Wpływ zjawiska *embedmentu* na wielkość dostępnej powierzchni ściany szczeliny dla przepływu węglowodorów

Z kolei głębokość wgniatania ziaren w skałę z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego pochodzącego z powstałego wgniecenia wpływa na spadek rozwartości szczeliny. W przypadku wgniatania wielu ziaren materiału podsadzkowego w ścianę szczeliny, efektywność jej podsadzenia dla różnej koncentracji powierzchniowych

podszadzki została przedstawiona przez Masłowskiego (2014, 2015, 2019), Masłowskiego i in. (2016, 2018b), Masłowskiego i Labus (2021) oraz Sato i Ichikawa (1998), na rysunku 2.24.



**Rys. 2.24** Wpływ zjawiska wgniatania wielu ziaren podsadzki w ściany szczeliny na wielkość rozwartości szczeliny (Sato i Ichikawa, 1998; zmienione)

Związane jest to zarówno z liczbą warstw ziaren podsadzki w szczelinie a także ze wzrostem podatności skały na zjawisko wgniatania ziaren materiału podsadzki w skałę złożową. Uwidacznia się w szczególności w przypadku podsadzenia szczeliny jedną warstwą ziaren podsadzki, charakteryzujących się małą średnicą. Wgniecenie wpływa na obniżenie pierwotnej rozwartości i przewodności szczeliny. Tym samym ogranicza uzyskanie efektywnego przepływu węglowodorów ze złoża poprzez szczelinę do odwiertu.

### 2.3.3. Doświadczenia światowe i krajowe

W dostępnej literaturze, związanej ze zjawiskiem wgniatania ziaren podsadzki w skałę złożową (tzw. embedment) przeważają dane z badań wykonanych dla różnych rodzajów skał pochodzących głównie z obszarów USA. W ostatnich latach pojawiły się także artykuły z badań dla krajowych złóż niekonwencjonalnych. Przedstawiają one zarówno teoretyczne rozważania, matematyczne modele oraz rzeczywiste symulacje zjawiska embedmentu w warunkach laboratoryjnych (zbliżonych do warunków panujących w skałe złożowej). Badania te wymagają zgromadzenia danych geomechanicznych i złożowych, przygotowania próbek skalnych do badań, zdefiniowaniu sposobu wytworzenia szczeliny, wykonaniu laboratoryjnej symulacji oraz obrazowaniu

uszkodzenia powierzchni skały przez ziarna podsadzki. Zostały także zaproponowane metodyki badawcze do wyznaczenia parametrów charakteryzujących to zjawisko wraz z oceną wpływu ich na efektywne podsadzenie szczeliny przez propant. Ma to na celu efektywniejsze wykonanie zabiegu hydraulicznego szczelinowania.

Do określenia rozwartości szczeliny zostały wykonane liczne badania i analizy. W tym celu zostały zaproponowane różne metody pomiarowe związane z odwzorowaniem zjawiska *embedment'u* w warunkach laboratoryjnych (Akrad i in., 2011; Alramahi i Sunberg, 2012; Ghanizadeh i in., 2016; Ghassemi i Suarez-Rivera, 2012a; Ghassemi i Suarez-Rivera, 2012b; Lacy i in., 1998; Liu, 2017; Mighani i in., 2015; Masłowski, 2015, 2020; Masłowski i Biały, 2016; Masłowski i in., 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2021; Masłowski i Labus, 2021; Morales i Tek, 2012; Much i in., 1987; Reinicke i in., 2010; Terracina i in., 2010; Volk i in., 1981; Zhang i in., 2014; Zhang i in., 2017). Zastosowano także różne modele matematyczne i równania empiryczne (Chen i in., 2017, 2018; Cooke, 1973; Cui i in., 2014; Guo i Liu, 2012; Guo i in., 2017; Huang i in., 2019; Huitt i McGlothlin, 1958; Li i in., 2015; Mueller i Amro, 2015; Pimenov i Kaneyskava, 2017; Volk i in., 1987; Xu i in., 2018; Zhang i Hou, 2016; Zheng i in., 2017). Na ich podstawie określano parametry charakteryzujące prezentowane niekorzystne zjawisko, wpływające na rozwartość szczeliny z podsadzką oraz jej przewidywaną do osiągnięcia przewodność, po zabiegu intensyfikacyjnym.

W warunkach laboratoryjnych, szczelina była najczęściej wytwarzana w sposób sztuczny, natomiast w pracach teoretycznych była przedstawiana przy użyciu różnych cyfrowych modeli matematycznych. W przypadku badań laboratoryjnych, szczelinę wypełniano tylko jedną warstwę ziaren podsadzki pomiędzy dwoma gładkimi powierzchniami czołowymi bloczków skalnych (Volk i in., 1981). Były one luźno umieszczane w prasie hydraulicznej i następnie pionowo działano na nie ciśnieniem ściskającym. Mogło to przyczyniać się do znacznego kruszenia się bloków skalnych przy wyższych wartościach zadawanych naprężeń. Tym samym powodowało to błędne wyznaczenie rzeczywistej rozwartości szczeliny poprzez wskazania mikrometrów. Zastosowanie takiej aparatury nie pozwalało na wykonanie testów w wyższych temperaturach złożowych. W celu uwzględnienia wyższych zakresów temperatur oraz ograniczenia rozkruszania się próbek skał zostały zaprojektowane i wykonane odpowiednie komory (Lacy i in., 1998; Reinicke i in., 2010; Masłowski, 2014, 2015, 2016, 2020; Masłowski i Biały, 2016; Masłowski i in., 2016, 2018b, 2019; Masłowski i Labus, 2021; Terracina i in., 2010). Komory tego typu wyposażone były w dodatkowy element



grzewczy. Podsadzka umieszczana była w nich pomiędzy dwoma cylindrycznymi rdzeniami skalnymi lub pomiędzy skalnym a stalowym rdzeniem. Szczelinę wytwarzano także poprzez zastosowanie dwóch kształtek skalnych, umieszczanych w raz z propantem w komorze API do testów przewodności warstwy podsadzki (Alramahi i Sunberg, 2012; ISO 13503-5:2006, 2006; Much i in., 1987; Mueller i Amro, 2015; Penny, 1987; Terracina i in., 2010; PN-EN ISO 13503-5, 2009; Zhang i in., 2014). Stosowano także wytworzenie szczeliny pomiędzy dwoma powierzchniami rozciętego lub mechanicznie rozłupanego wzdłuż cylindrycznego rdzenia skalnego, umieszczonego w specjalnie przygotowanym rękawie (Akrad i in., 2011; Ghanizadeh i in., 2016; Ghassemi i Suarez-Rivera, 2012a; Ghassemi i Suarez-Rivera, 2012b; Morales i Tek, 2012). Z kolei tego typu rozwiązanie utrudniało uzyskanie równomiernego rozmieszczenia ziaren podsadzki w szczelinie oraz stosowanie dużych jej koncentracji powierzchniowych. Utrudniało to także wyznaczenie rzeczywistej rozwartości szczeliny przy pomiarach przewodności.

Wykonane badania przewodności warstwy podsadzki przez Penny'ego (1987) na kształtkach piaskowcowych z OHIO wykazały, że głębokość wgniatania ziaren podsadzki kwarcowej i ceramicznej ISP wzrasta znacząco wraz ze zwiększaniem wartości naprężeń działających na skałę. Rozpatrywany zakres ich był od 20,7 MPa do 69,0 MPa i dotyczył temperatur 66 °C i 149 °C. Dla piasku pokrytego żywicą nie odnotowano znacznego wzrostu wgnieceń, tak jak w przypadku pozostałych dwóch podsadzek. Dodatkowe pokrycie ziaren podsadzek powłoką żywicy spowalniało ich kontakt z ziarnami skały. Tym samym przyczyniało się to do bardziej równomiernego rozkładu naprężeń wzdłuż powierzchni ściany szczeliny. Z kolei badania wykonane przez Alramahi'ego i Sundberg'a (2012) wykazały, że zjawisko embedmentu może znacząco wpływać na spadek przewodności wytworzonej szczeliny. Natomiast według Muellera i Amro (2015), uszkodzenie przewodności przez prezentowane zjawisko może sięgać rzędu od 10% do 60%. W przypadku skały łupkowej nasyconej wodą, utrata przewodności szczeliny może dochodzić nawet do 88%, przy ciśnieniu ściskającym 27,6 MPa (Zhang i in., 2014). Tym samym bardzo ważne jest wyznaczenie rzeczywistej rozwartości szczeliny do pomiarów przewodności warstwy podsadzki uszkodzonej przez płyny szczelinujące i inne niekorzystne zjawiska uaktywniające się po wykonanym zabiegu szczelinowania.

Początkowo wartość rozwartości szczeliny wyznaczano przy użyciu manualnych mikrometrów (Volk i in., 1981) lub ich cyfrowych odpowiedników umieszczonych przy prasie hydraulicznej. Określano ją na podstawie różnicy wskazań mikrometrów przed i po działaniu ciśnienia ściskającego na bloki skalne wraz z warstwą podsadzki. Uwzględniano

tutaj także odkształcenie komory pomiarowej i próbek skalnych, związane z wielkościami ciśnień ściskających i temperatury. Podczas określania wielkości odkształceń próbek skalnych dochodzi do zmian w ich strukturze w okolicach powierzchni czołowej rdzeni, w szczególności przy działaniu wysokich wartości naprężeń ściskających. Metoda ta nie uwzględniała wysokości materiału skalnego pochodzącego z wgnieceń powstałych na powierzchni skały. W wyniku pojawiania się nowych możliwości sprzętowych i specjalistycznych programów komputerowych zaczęto stosować nowe metody obrazowania powierzchni skały oraz jej analizy. Zaletą ich było bezkontaktowe analizowanie powierzchni skały. W tym celu wykorzystano między innymi: mikroskopy metalograficzne/optyczne (Ghassemi & Suarez-Rivera, 2012a, 2012b; Masłowski, 2014, 2015, 2016, 2020; Masłowski i Biały, 2016; Masłowski i in., 2016, 2018b, 2019; Masłowski i Labus, 2021; Morales i Tek, 2012; Suarez-Rivera i in., 2013; Terracina i in., 2010), skaningowe mikroskopy akustyczne (Akrad i in., 2011), mikroskopy elektronowe (Akrad i in., 2011) oraz profilometry laserowe. Mikroskopy były dodatkowo wyposażone w specjalistyczne oprogramowanie komputerowe pozwalające na topograficzne przedstawienie powierzchni skały wraz z jej analizą. Mikroskopy metalograficzne posiadające obiektywy optyczne połączone z kamerą cyfrową oraz także specjalistyczne cyfrowe oprogramowanie pozwalały na dokładną analizę topografii powierzchni. Pozwalały również na dokładniejsze wyznaczenie parametrów charakteryzujących wgniecenia ziaren podsadzki w skałę (embedment) niż w przypadku metody wykorzystującej mikrometry. Dla określenia rzeczywistej rozwarłośc szczeliny wypełnionej podsadzką o zadanej koncentracji powierzchniowej określano pierwotną (maksymalną do uzyskania) rozwarłośc szczeliny w zadanych warunkach temperatury, naprężenia ściskającego, po zadany okresie czasu. Następnie od tej wartości odejmowano wartość głębokości wgniatania się ziaren podsadzki w skałę.

W przypadku szczeliny podsadzonej jedną warstwą podsadzki (tabela 2.1) w skale piaskowcowej uwidaczniał się wpływ wartości naprężenia ściskającego na rozwarłośc szczeliny (Volk i inni, 1981). Przy wzroście ciśnienia z 27,6 MPa do 69 MPa, w temperaturze pokojowej podsadzka ceramiczna o dużych rozmiarach ziaren (0,850/0,425 mm i 1,700/0,850 mm) wciskała się coraz głębiej w powierzchnię skały nasyconej 2% roztworem KCl. Spadek pierwotnej rozwarłośc (1,32 mm) takiej szczeliny z podsadzką, dochodził nawet do 58,5%. Wzrost głębokości wgnieceń był zauważalny także podczas zjawiska odkształcenia sprężystego i tzw. „pełzania” skały występujących



w formacjach łupkowych (Guo i in., 2012; Liu, 2017; Mighani i in., 2015). Uwidacznia się to w szczególności pod wpływem zwiększania się ciśnienia ściskającego.

Zestawione w tabeli 2.1 wyniki badań embedmentu dla krajowych złóż niekonwencjonalnych pokazały, że dla skały piaskowcowej o zawartości kwarcu 38% i nasyconej płynem szczelinującym ziarna podsadzki wciskają się w ścianę szczeliny na głębokość równą 0,199 mm, przy ciśnieniu 82,7 MPa w temperaturze 25 °C (Masłowski i in., 2016). Odpowiadało to spadkowi jej pierwotnej rozwartości szczeliny o 17,4% oraz uszkodzeniu 29,1% powierzchni skały. W przypadku skały piaskowcowej o zawartości kwarcu (73%) i nasyceniu jej płynem szczelinującym, głębokość wgniecenia wraz z wysokością wycisku materiału skalnego w jedną ścianę szczeliny zmniejszyła się do wartości 0,084 mm, przy ciśnieniu efektywnym 86,5 MPa i temperaturze 127 °C (Masłowski, 2020). Uszkodzenie powierzchni skały wyniosło 31,5%. Wpływ ciśnienia na wielkość zjawiska *embedment*'u uwidaczniał się w szczególności skały łupkowej charakteryzującej się znaczną ilością minerałów ilastych (powyżej 48%) i nasyconej płynem szczelinującym (Masłowski i Biały, 2016). Autorzy zanotowali całkowite zamknięcie się szczeliny, przy ciśnieniu 68,9 MPa w temperaturze 28 °C. Głębokość wgniecenia w tym przypadku była równa 0,256 mm, a spadek rozwartości szczeliny wyniósł 99,6%. Także powierzchnia skały była prawie całkowicie uszkodzona przez ziarna podsadzki. Należy tutaj zaznaczyć, że w badaniach krajowych skał zastosowano powierzchnie ścian szczeliny o bardzo niskim współczynniku chropowatości.

Na wielkość wgniatania ziaren podsadzki w skałę wpływał także wzrost chropowatości powierzchni ściany szczeliny (Ghanizadeh i in., 2016; Jansen i in., 2015; Perez, 2015; Volk i in., 1981). Autorzy wykazali, że przy większych chropowatościach, wgniecenia podsadzki w skałę tworzą większe ścieżki dla przepływu węglowodorów. Natomiast dla gładkich powierzchni skały powstaje ich znacznie mniej. Z kolei Volk i in. (1981) przedstawili wyniki badań procentowego zamknięcia się szczeliny dla gładkiej powierzchni skały piaskowcowej oraz o zwiększonej chropowatości (powierzchnia odpowiadająca przełamaniu skały). Przy podsadzenia szczeliny propanem ceramicznym (boksytowym) o rozmiarze ziaren 0,850/0,425 mm. Przy zwiększaniu wartości naprężeń ściskających uzyskali dla powierzchni chropowatych szybsze zamykanie się szczeliny, niż miało to miejsce w przypadku powierzchni gładkiej. Stwierdzili także, że przy wyższych ciśnieniach ściskających szczelinę, głębokość wgnieceń nie jest zależna od chropowatości powierzchni skały. W przypadku analizy embedmetu na gładkich powierzchniach

uwidaczniał się wzrost ich chropowatości, w szczególności w przypadku wypełnienia szczeliny tylko jedną warstwą ziaren podsadzi (Li i in., 2017).

Badania laboratoryjne i analizy komputerowe (Lacy i in., 1998) wykazały, że znaczący wzrost wgniatania ziaren podsadzi w skałę oraz spadek przewodności szczeliny ma miejsce w szczególności skał o: zwiększonej zawartości minerałów ilastych, niskim statycznym module Young'a poniżej 13 GPa, twardości Brinella (BH) poniżej 20 kg/mm<sup>2</sup>. Skała o niskim module Young'a, przy ciśnieniu ściskającym 34,5 MPa charakteryzowała się bardzo dużą intensywnością zjawiska embedmentu (Alramahi i Sunberg, 2012). Niska wartość tego modułu mogła być związana ze zwiększoną ilością minerałów ilastych, węglanowych w składzie skały oraz także z wrażliwością ich na kontakt z wodą złożową lub płynem szczelinującym. Dla skały o niższej zawartości minerałów ilastych (10%), nie zanotowali wzrostu głębokości wgniecia ziaren podsadzi boksytowej o uziarnieniu 0,850/0,425 mm (głębokość wgniecia w jedną ścianę szczeliny była równa 0,050 mm, przy ciśnieniu 69 MPa). Natomiast znaczny jej wzrost odnotowano przy zawartości 52% (głębokość wgniecia = 0,450 mm, przy ciśnieniu 69 MPa). Według Kumara i innych (2012) moduł Young'a wzrastał dla łupka w przypadku obecności w jego składzie węgla oraz kwarcu. Tym samym zmniejszała się wówczas głębokość wgniatania ziaren podsadzi w skałę. Natomiast wyższa porowatość skały i TOC mogą prowadzić do obniżenia się wartości modułu Young'a, powodując skałą bardziej podatną na wgniatanie propantów o wysokiej wytrzymałości na zgniatanie. Z kolei wpływ współczynnika Poisson'a na wzrost embedmentu był bardzo mały (Guo i in., 2012).

Na wielkość zjawiska embedmentu wpływają także właściwości podsadzi, tj. rodzaj materiału oraz rozmiar jego ziaren (Penny, 1987). Badania te wykazały, że profil wgniecia ziaren piasku utwardzanych powłoką żywicy był znacząco inny niż w przypadku ich nie utwardzania oraz podsadzi o średniej wytrzymałości na zgniatanie. Wpływ rodzaju materiału podsadzkowego na głębokość wgniatania się jego ziaren w skałę łupkową (pochodzącą z różnych obszarów USA) przedstawili Terracina i inni (2010), (tabela 2.1). Dla łupka z obszaru Bakked Shale, podsadzka kwarcowa (CRCS) pokryta żywicą (0,850/0,425 mm), przy ciśnieniu ściskającym 58,6 MPa w temperaturze 135 °C wgniałała się w ścianę szczeliny na głębokość mniejszą niż piasek nie pokryty warstwą żywicy oraz lekka podsadzka ceramiczna (LWC). Głębokość wgniecia na powierzchni skały spowodowane przez podsadzkę LWC była ok. 2,6 razy większa od podsadzi CRCS (0,044 mm). Natomiast ziarna piasku wgniały się na głębokość równą 0,108 mm. Z kolei dla łupka z obszaru Haynesville Shale, zastosowanie podsadzek o rozmiarach ziaren

0,425/0,180 mm, przy ciśnieniu 69 MPa w temperaturze 149 °C wykazało analogiczny wzrost głębokości wgniecia podszki LWC (0,202 mm) w stosunku do CRCS (0,105 mm). Podszka LWC i piasek powodowały większe powstawanie okruchów oraz kruszenia ziaren skały niż w przypadku podszki pokrytej warstwą żywicy. W przypadku podszek kwarcowych oraz podszek pokrytych warstwą żywicy, zjawisko to jest ograniczone. Zatykanie przestrzeni porowej skały przez skruszone jej ziarna wpływa znacząco na zmniejszenie się przepuszczalności skały w obrębie ściany szczeliny.

Według Weaver i in. (2005), ziarna podszek ceramicznych bardziej uszkadzały ściany szczeliny niż podszka kwarcowa, porowata podszka ceramiczna oraz ziarna podszki dodatkowo pokryte warstwą żywicy. Autorzy udowodnili, że powłoka żywicy uplastycznia materiał podszkowy, który zmniejsza naprężenie w kontakcie jej ze ziarnami skały. Tym samym zwiększała się efektywność podszki szczeliny.

Także w przypadku skał krajowych odnotowano wpływ rodzaju materiału podszkowego na wielkość zjawiska embedmentu. Wzrost rozmiaru ziaren podszki ceramicznej podczas wypełnienia nią szczeliny w skale łupkowej (nasyconej płynem szczelinującym) przyczyniał się do ograniczenia głębokości wgniecia z uwzględnieniem wysokości wycisku materiału skalnego, nawet do 0,146 mm (Masłowski i Labus, 2021). Powodował on spadek pierwotnej rozwartości szczeliny tylko o 12,1%, przy ciśnieniu 65,5 MPa i temperaturze 96 °C. W przypadku skał piaskowcowych o dużej zawartości kwarcu (powyżej 70%), rozmiar ziaren nie powodował znaczącego wzrostu głębokości wgniecia.

Na głębokość wgniatania ziarna podszki w skałę wpływała także wrażliwość minerałów skały na płyny złożowe oraz płyn szczelinujący (tabela 2.1). Występowało tutaj znaczne uaktywnienie wzrostu głębokości wgniecia na powierzchni skały, jak i również wielkości jej uszkodzenia przez ziarna podszki. Uwidaczniało się to w szczególności skał łupkowych o dużej zawartości minerałów ilastych (powyżej 48%). W takich przypadkach głębokość wgniecia wynosiła nawet 50 % średniej średnicy ziaren podszki, przy ciśnieniu ściskającym 27,6 MPa (Zhang i in., 2014). Natomiast dla skały suchej wynosiło tylko 15%. W szczególnych sytuacjach dochodziło do znacznego spadku pierwotnej rozwartości szczeliny (Masłowski, 2015), a nawet do całkowitego jej zamknięcia (Masłowski i Biały, 2016). W przypadku skał piaskowcowych o dużej zawartości kwarcu, nie występował znaczący wzrost głębokości wgniecia przy wyższych ciśnieniach ściskających (Masłowski i in., 2016).

Przedstawione powyżej parametry wpływają na wielkość przewodności szczeliny w części warstwy podsadzki, umożliwiającej przepływ węglowodorów przez nią do odwiertu. Z kolei na wielkość przepływu węglowodorów ze skały do warstwy podsadzki wpływają parametry związane z uszkodzeniem skały w obrębie ściany szczeliny. Jednym z takich parametrów jest uszkodzenie powierzchni skały w kontakcie jej z ziarnami podsadzi. Dochodzi wówczas do kruszenia się ziaren skały, które przyczyniają się do zatykania wolnej jej przestrzeni porowej i ograniczenia przepływu węglowodorów.

Wielkości uszkodzenia skał krajowych przez różne technologie stosowane do szczelinowania zestawiono w tabeli 2.2.

Na podstawie zgromadzonych danych, dla suchej skały piaskowcowej typu zamkniętego, wgniatające się w nią ziarna podsadzki ceramicznej (o średnicy ziaren rzędu  $0,815 \div 0,425$  mm) powodowały uszkodzenie równe 32,6% (Masłowski i in., 2016). Odnotowano je przy ciśnieniu efektywnym 82,7 MPa w temperaturze pokojowej. Nasylenie takiej skały płynem szczelinującym nie przyczyniało się do wzrostu procentowego uszkodzenia powierzchni. Dodatkowy wzrost ciśnienia i temperatury także nie powodował zwiększenia jej uszkodzenia (Masłowski, 2020). Z kolei zwiększona obecność minerałów ilastych do 54% w skale powodowała wzrost takiego uszkodzenia w przypadku nasycenia jej płynem szczelinującym (Masłowski i in., 2018b; Masłowski i in., 2019; Masłowski i Labus, 2021). Wielkość ta dochodziła dla łupka z obszaru basenu bałtyckiego do wartości 46,2%, przy ciśnieniu 65,5 MPa w 96 °C. W przypadku niższych wartości ciśnienia 48,3 MPa i temperatury 70 °C oraz użycia mniejszych ziaren podsadzki ceramicznej łupek sylurski nasycony płynem charakteryzował się podobnym uszkodzeniem, rzędu  $38,7 \div 41,2\%$ . Masłowski (2019) wykazał, że łupek sylurski w postaci suchej posiada uszkodzenie powierzchni znacznie mniejsze, tj. 20,4%. Tym samym widać, że rodzaj technologii użytej do szczelinowania skały łupkowej wpływa znacząco na spadek jej odporności na zjawisko wgniatania się w nią ziaren podsadzki.

**Tabela 2.1** Zestawienie przykładowych wyników badań i analiz rozwarłości szczeliny dla różnych skał i technologii hydraulicznego szczelinowania

Oznaczenia w tabeli: Q – kwarc, W – minerały węglanowe, I – minerały ilaste, \* – średnia głębokość wgniecenia ziarna podsadzki w jedną ścianę szczeliny, w mm

Rodzaj skały	Skład mineralny skały	Rodzaj powierzchni skały (ściana szczeliny), chropowatość, mm	Współcz. Poisson'a, –	Moduł Young'a, GPa	Rodzaj oraz rozmiar ziaren podsadzki, mm	Koncentr. powierzh. Podsadzki, kg/m <sup>2</sup>	Nasycenie skały płynem	Ciśnienie ściskające, MPa	Temp., °C	Czas działania naprężen, godz.	Całkowita głębokość wgniatania podsadzki w ściany szczeliny mm	Rozwarłość szczeliny, mm (Spadek rozwarłości szczeliny, %)	Literatura
<b>Terytorium USA</b>													
Piaskowiec Berea (szary)	Q - 78%, W - 4%, I - 15%	gładka	brak danych	brak danych	Boksyt, 0,850/0,425	jedna warstwa, 0,132	2% KCl	27,6	pokojowa	0,017	0,32 (0,160)*	0,67 (32,8)	Volk i in., 1981
		przełamana	brak danych	brak danych	Boksyt, 0,850/0,425	jedna warstwa, 0,132	2% KCl	27,6	pokojowa	0,017	0,61 (0,305)*	0,71 (45,9)	
		gładka	brak danych	brak danych	Boksyt, 1,700/0,850	jedna warstwa, 0,249	2% KCl	27,6	pokojowa	0,017	0,46 (0,230)*	1,54 (23,1)	
		przełamana	brak danych	brak danych	Boksyt, 1,700/0,850	jedna warstwa, 0,249	2% KCl	27,6	pokojowa	0,017	1,02 (0,510)*	1,78 (36,6)	
		gładka	brak danych	brak danych	Boksyt, 0,850/0,425	jedna warstwa, 0,132	2% KCl	69	pokojowa	0,017	0,43 (0,215)*	0,56 (43,6)	
		przełamana	brak danych	brak danych	Boksyt, 0,850/0,425	jedna warstwa, 0,132	2% KCl	69	pokojowa	0,017	0,77 (0,385)*	0,55 (58,5)	
		gładka	brak danych	brak danych	Boksyt, 1,700/0,850	jedna warstwa, 0,249	2% KCl	69	pokojowa	0,017	0,69 (0,345)*	1,31 (34,7)	
		przełamana	brak danych	brak danych	Boksyt, 1,700/0,850	jedna warstwa, 0,249	2% KCl	69	pokojowa	0,017	1,33 (0,665)*	1,47 (47,6)	

Łupek (Bakken Shale)	brak danych	brak danych	brak danych	brak danych	Piasek, 0,850/0,425	9,76	brak danych	58,6	135	120	0,216 (0,108)*	brak danych	Terracina i in., 2010
		brak danych	brak danych	brak danych	Piasek pokryty żywicą, 0,850/0,425	9,76	brak danych	58,6	135	120	0,088 (0,044)*	brak danych	
		brak danych	brak danych	brak danych	Lekka podsadzka ceramiczna, 0,850/0,425	9,76	brak danych	58,6	135	120	0,226 (0,113)*	brak danych	
Łupek (Haynesville Shale)	brak danych	brak danych	brak danych	brak danych	Piasek pokryty żywicą, 0,425/0,212	9,76	brak danych	69	149	72	0,210 (0,105)*	brak danych	
		brak danych	brak danych	brak danych	Lekka podsadzka ceramiczna, 0,425/0,180	4,88	brak danych	69	149	72	0,403 (0,202)*	2,747 (12,8)	
Łupek	I - 10%	brak danych	brak danych	brak danych	Boksyt, 0,850/0,425	brak danych	3% KCl	69	brak danych	brak danych	0,100 (0,050)*	brak danych	Alramahi i Sunberg (2012)
	I - 52%	brak danych	brak danych	brak danych	Boksyt, 0,850/0,425	brak danych	3% KCl	69	brak danych	brak danych	0,900 (0,450)*	brak danych	
<b><u>Terytorium Polski</u></b>													
Piaskowiec „tight gas”	Q - 38%, W - 19%, I - 27%	gładka, (0,0094)	brak danych	brak danych	Propant ceramiczny ISP, 0,850/0,425	4,88	Sucha skała	82,7	25	6	0,394 (0,197)*	1,893 (17,2)	Masłowski i in., 2016
		gładka, (0,0094)	brak danych	brak danych	Propant ceramiczny ISP, 0,850/0,425	4,88	Polimer naturalny	82,7	25	6	0,397 (0,199)*	1,889 (17,4)	

Piaskowiec „tight gas” z czerwonego spągowca	Q - 73%, W - 4%, I - 7%	gładka, (0,0143÷0,0162)	brak danych	brak danych	Propant ceramiczny ISP, 0,850/0,425	4,88	Sieciowany polimer naturalny	86,5	127	6	0,168 (0,084)*	brak danych	Masłowski, 2020
Łupek sylurski	Q - 24%, W - 14%, I - 48%	gładka, (0,0005)	brak danych	brak danych	Piasek, 0,425/0,212	0,98	Sucha skała	41,4	25	6	0,209 (0,105)*	0,343 (37,8)	Masłowski, 2015
		gładka, (0,0005)	brak danych	brak danych	Piasek, 0,425/0,212	0,98	Płyn typu „slickwater”	41,4	28	6	0,416 (0,208)*	0,136 (75,3)	Masłowski, 2015; Masłowski i Biały, 2016
		gładka, (0,0005)	brak danych	brak danych	Lekki proppant ceramiczny LWP, 0,425/0,212	0,98	Płyn typu „slickwater”	68,9	28	6	0,512 (0,256)*	0,002 (99,6)	Masłowski i Biały, 2016
		gładka, (0,0003÷0,0007)	brak danych	brak danych	Lekki proppant ceramiczny LWP, 0,600/0,300	2,44	Polimer naturalny	48,3	70	6	0,103 (0,052)*	brak danych	Masłowski i in., 2019
		gładka, (0,0004÷0,0007)	brak danych	brak danych	Lekki proppant ceramiczny LWP, 0,600/0,300	2,44	Polimer naturalny	48,3	70	6	0,089 (0,045)*	1,425 (5,9)	Masłowski i in., 2018b
Łupek z obszaru basenu bałtyckiego	Q - 23%, W - 13%, I - 54%	gładka, (0,0003÷0,0004)	$v_d = 0,31$	$E_d = 18,1$	Propant ceramiczny ISP, 0,850/0,425	4,88	Sieciowany polimer naturalny	65,5	96	6	0,293 (0,146)*	2,137 (12,1)	Masłowski i Labus, 2021

**Tabela 2.2** Zestawienie przykładowych wyników badań i analiz uszkodzenia powierzchni ściany szczeliny dla różnych skał i technologii hydraulicznego szczelinowania

Oznaczenia w tabeli: Q – kwarc, W – minerały węglanowe, I – minerały ilaste

Rodzaj skały	Skład mineralny skały	Rodzaj powierzchni skały (ściana szczeliny), chropowatość, mm	Współcz. Poisson'a, –	Moduł Young'a, GPa	Rodzaj oraz rozmiar ziaren podsadzki, mm	Koncentr. powierzchni. Podsadzki, kg/m <sup>2</sup>	Nasylenie skały płynem	Ciśnienie ściskające, MPa	Temp., °C	Czas działania naprężeń, godz.	Uszkodzenie pow. ściany szczeliny przez ziarna podsadzki, %	Zmiany pow. ściany szczeliny przez wycisk materiału skalnego, %	Literatura
Piaskowiec „tight gas”	Q - 38%, W - 19%, I - 27%	gładka, (0,0094)	brak danych	brak danych	Propant ceramiczny ISP, 0,850/0,425	4,88	Skała sucha	82,7	25	6	32,6	brak danych	Masłowski i in., 2016
		gładka, (0,0094)	brak danych	brak danych	Propant ceramiczny ISP, 0,850/0,425	4,88	Polimer naturalny	82,7	25	6	29,1	brak danych	
Piaskowiec tight gas” z czerwonego spągowca	Q - 73%, W - 4%, I - 7%	gładka, (0,0143÷0,0162)	brak danych	brak danych	Propant ceramiczny ISP, 0,850/0,425	4,88	Sieciowany polimer naturalny	86,5	127	6	31,5	brak danych	Masłowski, 2020
Łupek sylurski	Q - 24%, W - 14%, I - 48%	gładka, (0,0005)	brak danych	brak danych	Piasek, 0,425/0,212	0,98	Sucha skała	41,4	25	6	20,4	brak danych	Masłowski, 2015
		gładka, (0,0005)	brak danych	brak danych	Piasek, 0,425/0,212	0,98	Płyn typu „slickwater”	41,4	28	6	27,4	brak danych	



		gładka, (0,0003÷0,0007)	brak danych	brak danych	Lekki proppant ceramiczny LWP, 0,600/0,300	2,44	Polimer naturalny	48,3	70	6	38,7	brak danych	Masłowski i in., 2019
		gładka, (0,0004÷0,0007)	brak danych	brak danych	Lekki proppant ceramiczny LWP, 0,600/0,300	2,44	Polimer naturalny	48,3	70	6	41,2	brak danych	Masłowski i in., 2018b
Łupek z obszaru basenu bałtyckiego	Q - 23%, W - 13%, I - 54%	gładka, (0,0003÷0,0004)	$v_d = 0,31$	$E_d = 18,1$	Proppant ceramiczny ISP, 0,850/0,425	4,88	Sieciowany polimer naturalny	65,5	96	6	46,2	39,8	Masłowski i Labus, 2021

W zestawionych wynikach badań w tabeli 2.1 i 2.2, w jednym z artykułów Masłowski i Labus (2021) zaproponowali metodykę do oszacowania istotności statystycznej przeprowadzonych pomiarów. Do tej analizy wykorzystano dwa parametry (tj. głębokość wgniecenia na powierzchni skały oraz wysokość wycisku materiału skalnego).

Należy tutaj także zwrócić uwagę, że zaprezentowane wyniki badań w artykułach Masłowskiego (2020) oraz Masłowskiego i Labus (2021), obejmowały wstępny etap badań, podsumowanych w niniejszej pracy. Zdaniem autora, sposób analizy danych pomiarowych wymagał weryfikacji i dopracowania, co uwzględniono w dalszych rozdziałach pracy.

Podsumowując, na wielkość parametrów charakteryzujących zjawisko embedmentu wpływają między innymi: skład mineralny skały, właściwości geomechaniczne skały, warunki złożowe, płyny złożowe oraz rodzaj technologii użytej do zabiegu hydraulicznego szczelinowania. Źródła literaturowe wskazują też, że skała o podwyższonej zawartości minerałów ilastych charakteryzuje się zwiększoną plastycznością. Skała tego rodzaju posiada zmniejszoną podatność na pękanie podczas zabiegu intensyfikacyjnego oraz zwiększoną podatność na zjawisko embedmentu, po jego zakończeniu. Tym samym wymaga ona specjalnej techniki stymulacji, związanej z efektywnym podsadzeniem wytworzonej szczeliny.

Najbardziej wiarygodne wyniki dają badania wykonywane w warunkach laboratoryjnych (zbliżonych do warunków złożowych), w których wykorzystuje się próbki skał pobranych z analizowanych formacji złożowych. Ważne jest także zastosowanie płynu złożowego, płynu szczelinującego oraz materiału podsadzkowego użytych do wykonania zabiegu hydraulicznego szczelinowania. W przypadku braku możliwości uzyskania próbek skały, płynów i podsadzki wykorzystuje się teoretyczne modele matematyczne. Pozwalają one na wstępną analizę parametrów zjawiska embedmentu oraz wyznaczenie przewidywanej do uzyskania przewodności szczeliny wypełnionej podsadzką w zadanych warunkach złożowych. Wiele takich modeli zostało opracowanych z pewnymi ograniczeniami, które mogą obniżać ich dokładność dotyczącą określenia rzeczywistego embedmentu.

Istnieje także duża liczba czynników wpływających na wielkość prezentowanego niekorzystnego zjawiska, stąd korelacja między badaniami jest znacznie utrudniona.

W kolejnych rozdziałach rozprawy doktorskiej starano się tak opracować metodykę badawczą i analizę wyników, aby można było obiektywnie porównać ze sobą wyniki badań

zjawiska embedmentu dla dwóch odmiennych rodzajów skał złożowych. Doprecyzowano także metodykę oszacowania istotności statystycznej przeprowadzonych pomiarów. Różnice w wykonaniu laboratoryjnej symulacji dotyczyły głównie warunków złożowych, takich jak temperatura i naprężenie ściskające oraz rodzaju płynu szczelinującego. Zostały także wykonane analizy dotyczące zmian w morfologii powierzchni skał o różnym składzie mineralnym spowodowanych przez wgniatające się w nią ziarna podsadzki. Tego typu analizy mogą poszerzyć dodatkową ocenę przestrzeni dostępnej dla przepływu węglowodorów w obrębie ściany szczeliny.

### 3. Metodyka badań

W ostatnich latach literatura światowa podaje różne metodyki badań, laboratoryjnych i symulacji komputerowych zjawiska wgniatania materiału podsadzkowego w skałę złożową oraz nowatorskie analizy i interpretacje uzyskanych wyników. Wszystkie te działania służyły do oceny wpływu zjawiska embedmentu na efektywność podsadzenia szczeliny wytworzonej w zabiegu hydraulicznego szczelinowania. Miało to na celu ocenę efektywnego przepływu węglowodorów ze skały do szczeliny i kolejno nią do odwiertu. Opracowane metodyki badawcze przez cały czas są doskonalone wraz ze zwiększeniem możliwości sprzętowych oraz oprogramowania komputerowego.

Dla prawidłowego przeprowadzenia badań i analiz wpływu zjawiska embedmentu na efektywność podsadzenia szczeliny w wytypowanych polskich złożach niekonwencjonalnych przeprowadzono szereg wstępnych badań, które w efekcie zmierzały do opracowania własnej metodyki przeprowadzenia eksperymentów i opracowania wyników.

#### 3.1. Określenie warunków badań

Charakterystyka warunków geologiczno-złożowych polegała na analizie dostępnych danych wytypowanych złóż niekonwencjonalnych. Dotyczyła ona formacji piaskowcowej typu zamkniętego oraz formacji typu łupkowego.

Niezbędne informacje do wykonania analizy to:

- głębokość zalegania wytypowanych skał złożowych przewidzianych do wykonania zabiegu hydraulicznego szczelinowania,
- rodzaj i kierunek naprężeń panujących w górotworze,
- wielkość naprężenia zamknięcia szczeliny,
- wartości ciśnienia złożowego,
- temperatura złożowa,
- rodzaj płynu złożowego.

Średnia głębokość  $H_z$  zalegania badanej formacji złożowej została określona na podstawie dostępnych danych literaturowych, związanych z granicznymi głębokościami jej zalegania na terytorium Polski.

Średnią temperaturę  $T$  panującą w danej formacji złożowej określono na podstawie średniej temperatury wyznaczonej na podstawie równania (3.1).

$$T = grad.geot \cdot H_z \quad (3.1)$$

gdzie:

$T$  – temperatura złożowa, °C

$grad.geot$  – gradient geotermiczny odpowiadający badanemu obszarowi występowania formacji złożowej, °C/m

$H_z$  – głębokość zalegania formacji złożowej, m

Ze względu na brak dostępnych danych o temperaturze złożowej dla badanych obszarów przyjęto gradient geotermiczny 0,030 °C / 1 m, który odpowiada średniej wartości stopnia geotermicznego w skali globalnej, równemu 33 m / 1 °C, (źródło: <https://pl.wikipedia.org>, 2018).

Dla badanych formacji złożowych, brak jest dostępnych danych o wielkościach naprężeń panujących w górotworze. W pracy założono dla nich reżim ekstensyjny, gdzie rozkład naprężeń jest następujący  $\sigma_V > \sigma_H > \sigma_h$ .

Zgodnie z tym założeniem, przyjęto do badań wielkości minimalnych naprężeń poziomych  $\sigma_h$ , które na dużych głębokościach powodują zamykanie szczeliny. W takim przypadku, wartość efektywnego ciśnienia ściskającego szczelinę i podsadzkę  $P_{ef}$ , jest rozumiana jako ciśnienie zamknięcia szczeliny  $P_z$ , równe minimalnemu naprężeniu poziomemu. Wartość  $P_{ef}$ , wyrażoną w MPa, wyznaczono zgodnie z równaniem (3.2).

$$P_{ef} = grad.zamk \cdot H_z \quad (3.2)$$

gdzie:

$grad.zamk$  – gradient naprężenia zamknięcia szczeliny (odpowiadający badanemu obszarowi formacji złożowej), MPa/m

Ze względu na brak dostępnych danych o wielkościach gradientu naprężenia zamknięcia szczeliny, dla badanych obszarów formacji łupkowej i piaskowcowej przyjęto wartość minimalnego naprężenia poziomego netto, równego 0,02035 MPa/m (tj. 0,90 psi/ft), (źródło zastrzeżone dla ogólnodostępnej publikacji). Uwzględniał on wartości ciśnienia porowego i złożowego.

Przedstawione powyższe dane posłużyły do odwzorowania przybliżonych warunków geologiczno-złożowych w badaniach laboratoryjnych.

### **3.2. Przygotowanie próbek skał do badań**

Próbki skał pochodziły z otworów wiertniczych zlokalizowanych na terytorium Polski. Reprezentowały one dwa rodzaje wytypowanych złóż niekonwencjonalnych. Były to: skała piaskowcowa typu zamkniętego oraz skała typu łupkowego. Uzyskane rdzenie wiertnicze posłużyły do przygotowania prób okruchowych oraz rdzeni cylindrycznych o średnicy 2,54 cm. Rdzenie cylindryczne zostały wycięte równolegle do uwarstwienia, a ich powierzchnie zostały wyrównane w taki sposób, aby miały podobną chropowatość. Tak przygotowane próbki wykorzystano do analiz ich właściwości oraz laboratoryjnej symulacji zjawiska embedmentu.

### **3.3. Oznaczenie składu mineralnego skał**

Badania składu mineralnego próbek skalnych wykonano w Zakładzie Geofizyki Wiertniczej w Instytucie Nafty i Gazu – Państwowym Instytucie Badawczym w Krakowie. Analizę składu mineralnego wykonano przy użyciu dyfrakcji rentgenowskiej. Pomiary ilościowe wykonane zostały na aparacie X'Pert Pro firmy Panalytical wyposażonym w nowoczesny licznik paskowy X'Celerator. Zastosowane preparaty pomiarowe dezorientowane sporządzano zgodnie z procedurą zalecaną specjalnie dla skał zawierających dużą ilość minerałów ilastych (Środoń i in., 2001). Próbka skały była zmielona i homogeniczna (równomiernie wymieszana z wzorcem wewnętrznym). Pomiary przeprowadzono na preparatach dezorientowanych, co zapewniło uzyskanie rzeczywistych proporcji składników mineralnych występujących w próbkach (unika się błędów związanych z orientacją kryształów o pokroju blaszkowym). Preparat miał również odpowiednią i powtarzalną gęstość oraz grubość, tak aby warunki pomiarowe dla każdej próbki były takie same. Jako wzorzec wewnętrzny pozwalający kontrolować jakość analizy wykorzystano tlenek cynku ZnO. Zastosowano napięcie wzbudzenia 40 kV, natężenie prądu anodowego 34 mA, krok pomiarowy  $0,02^{\circ}2\theta$  oraz zakres pomiarowy od 5 do  $65^{\circ}2\theta$ . Ilościowy skład mineralny próbek skalnych wyliczany był metodą Rietvelda (1969) przy pomocy programu komputerowego SIROQUANT.

### **3.4. Wyznaczenie właściwości petrofizycznych skał**

Dla scharakteryzowania właściwości petrofizycznych skał użytych do badań oznaczono między innymi: współczynnik przepuszczalności efektywnej, współczynnik

porowatości efektywnej, gęstość objętościową, dynamiczny współczynnik Poisson'a, dynamiczny moduł Young'a, moduł sprężystości postaciowej, moduł sprężystości objętościowej oraz wskaźnik kruchości skały. Wyznaczone wielkości pozwoliły na prawidłowe rozpoznanie parametrów skały złożowej oraz wstępne wytypowanie technologii do jej hydraulicznego szczelinowania.

Wartość współczynnika przepuszczalności absolutnej dla gazu wyznaczono w przepuszczalnościomierzu gazowym DPG-100. Zasada pomiaru polegała na rejestracji ilości przepływającego azotu przez przestrzeń porową próbki rdzeniowej, o znanej długości oraz średnicy. Badania wykonano w zadanych warunkach ciśnienia uszczelnienia rdzenia oraz ciśnienia przykładanego od czoła rdzenia, w temperaturze otoczenia. Przepuszczalność absolutna skały  $k$  była wyznaczana według równania (3.3).

$$k = \frac{742,308 \cdot \mu_g \cdot t_g \cdot l \cdot V_n}{F \cdot (P_1^2 - P_2^2)} \quad (3.3)$$

gdzie:

$\mu_g$  – lepkość dynamiczna gazu,  $Ns/m^2$

$t_g$  – temperatura przepływającego gazu,  $^{\circ}K$

$l$  – długość rdzenia,  $m$

$V_n$  – objętościowy wydatek gazu,  $nm^3/s$

$F$  – pole przekroju poprzecznego rdzenia,  $m^2$

$B$  – ciśnienie barometryczne,  $N/m^2$

$P_1$  – ciśnienie przed próbką ( $P_1 + B$ ),  $N/m^2$

$P_2$  – ciśnienie za próbką ( $P_2 = B$ ),  $N/m^2$

Zakres pomiarowy urządzenia wynosi od  $0,01 \cdot 10^{-15} m^2$  do  $1 \cdot 10^{-15} m^2$ . Dokładność wyznaczenia współczynnika przepuszczalności  $k$  wynosi  $0,01 \cdot 10^{-15} m^2$ .

Wartość współczynnika porowatości efektywnej skał wyznaczona została na podstawie pomiarów wykonanych przy użyciu porozymetru helowego HGP-100 firmy EPS oraz wagi rtęciowej. Oznaczenie objętości porów polega na ekspansji zadanej objętości helu (według prawa Boyle'a) do przestrzeni porowej rdzenia i obserwacji spadku ciśnienia. Hel penetruje wszystkie przestrzenie porowe, które są dostępne dla przepływu tj. wszystkie pory połączone ze sobą. Obliczenia porowatości bazujące na tym pomiarze pozwalają określić porowatość efektywną. Ponieważ hel ma bardzo małe molekuly prawdopodobne jest, że penetruje on wszystkie dostępne przestrzenie porowe. W połączeniu z pomiarem z wykorzystaniem wagi rtęciowej, służącej do pomiaru całkowitej objętości rdzenia, urządzenie pozwala wyznaczyć porowatość efektywną  $\phi_e$

próbek skał zgodnie z równaniem (3.4) oraz gęstość objętościową - równanie (3.5). Wartość gęstości objętościowej wyznaczono w oparciu o masę rdzenia określonej podczas ważenia w powietrzu i w rtęci.

$$\phi_e = \frac{(V_b - V_g)}{V_b} \cdot 100 \quad (3.4)$$

gdzie:

$V_g$  – wartość równa  $k-c/P_{xc}$ ,  $cm^3$ , ( $k$  i  $c$  to współczynniki kalibracyjne,  $P_{xc}$  to spadek ciśnienia helu)

$V_b$  – objętość rdzenia równa  $m_r/\rho$ ,  $cm^3$ , ( $m_r$  to masa próbki w rtęci,  $\rho$  to szkieletowa gęstość skały w  $g/cm^3$  równa  $m_p/V_g$ , gdzie  $m_p$  to masa próbki w powietrzu)

$$\rho = \frac{m_p}{V_b} \quad (3.5)$$

Dokładność pomiaru gęstości objętościowej jest rzędu  $0,01 \text{ kg/m}^3$ . Natomiast dokładność wyznaczenia współczynnika porowatości efektywnej  $\phi_e$  wynosi  $\pm 0,01\%$ .

Pomiary dynamicznego współczynnika Poisson'a oraz modułu Young'a dla cylindrycznych rdzeni wykonano na urządzeniu AVS-700 produkcji VINCI Technologies (Rys. 3.1).



**Rys. 3.1** Urządzenie AVS-700 firmy VINCI Technologies, w INiG-PIB

Pomiar polegał na wyznaczeniu czasów przejścia fal P i S przez rdzeń. Na tej podstawie obliczono prędkości fal oraz dynamiczne parametry sprężystości. Do obliczeń parametrów wykorzystano równania (3.6) i (3.7), stosowane przez Fjaer i in. (2008) oraz Moska i Masłowskiego (2019).



$$v_d = \frac{1/2 - (V_S/V_P)^2}{1 - (V_S/V_P)^2} \quad (3.6)$$

gdzie:

$v_d$  – dynamiczny współczynnik Poisson’a, *wartość bezwymiarowa*

$V_S$  – prędkość propagacji fali poprzecznej S, *m/s*

$V_P$  – prędkość propagacji fali podłużnej P, *m/s*

$$E_d = \rho \frac{V_P^2 (1 + v_d)(1 - 2 \cdot v_d)}{(1 - v_d)} \quad (3.7)$$

gdzie:

$E_d$  – dynamiczny moduł Young’a, *GPa*

Dokładność wyznaczenia modułu Young’a wynosi 0,1 GPa, a współczynnika Poisson’a, 0,01 (-).

Podczas badań rdzeń umieszczano w komorze rdzeniowej, umożliwiającej pomiar właściwości sprężystych skał podczas konwencjonalnego, trójosiowego ściskania w temperaturze i stanie naprężeń odpowiadającym warunkom złożowym. Badania wykonano w wybranych temperaturach i naprężeniach. Dla piaskowca, skała była wstępnie nasycana w 2% roztworze KCl. Odbywało się ono w warunkach próżniowych przez 24 godziny, w temperaturze otoczenia. Dodatkowe dosycenie skały solanką w komorze rdzeniowej urządzenia AVS-700, umożliwiło wytworzenie ciśnienia porowego w rdzeniu oraz zapobiegało wrzeniu solanki (przyjęto wartość 3,45 MPa). Uwzględnienie ciśnienia w przestrzeni porowej, wraz z naprężeniami pionowymi oraz poziomymi determinują ciśnienie efektywne wywierane na szkielet skalny. Nasycenie przestrzeni porowej skały piaskowcowej solanką miało także na celu wyparcie powietrza, którego obecność może powodować zaniżenie wartości modułów  $E_d$ ,  $v_d$ , oraz dynamicznego modułu sprężystości objętości (ang. *bulk modulus*), (Bała, 1990). W przypadku łupka odstąpiono od nasycenia skały solanką, gdyż posiadała ona teksturę zbitą o bardzo małej porowatości i przepuszczalności oraz znaczną ilość minerałów ilastych. Natomiast ze względu na ograniczenia sprzętowe AVS-700, badania nie mogły być wykonane powyżej temperatury 120 °C i ciśnienia 62,1 MPa.

Moduł sprężystości postaciowej  $K$  wyrażony w *Pa*, wyznaczono zgodnie z równaniem (3.8).

$$K = \rho \cdot \left( V_P^2 - \frac{4}{3} \cdot V_S^2 \right) \quad (3.8)$$

Moduł sprężystości objętościowej  $\mu$  wyrażony w  $Pa$ , wyznaczono zgodnie z równaniem (3.9).

$$\mu = \rho \cdot V_S^2 \quad (3.9)$$

Wskaźnik kruchość brittleness ( $BRIT$ ) badanej skały został wyznaczony w oparciu o zestawienie dynamicznego modułu Young'a i współczynnika Poisson'a, według metody Griesser i Bray (2007), opisaney równaniami (3.10), (3.11) i (3.12).

$$YM_{BRIT} = \frac{YM - YM_{min}}{YM_{max} - YM_{min}} \cdot 100 \quad (3.10)$$

$$PR_{BRIT} = \frac{PR - PR_{max}}{PR_{min} - PR_{max}} \cdot 100 \quad (3.11)$$

$$BRIT = \frac{YM_{BRIT} + PR_{BRIT}}{2} \quad (3.12)$$

gdzie:

$YM_{BRIT}$  – kruchość z dynamicznego modułu Young'a, %

$PR_{BRIT}$  – kruchość z dynamicznego współczynnika Poisson'a, %

$YM$  – zmierzony dynamiczny moduł Young'a ( $E_d$ ),  $GPa$

$PR$  – zmierzony dynamiczny współczynnik Poisson'a ( $\nu_d$ ), wartość bezwymiarowa

$YM_{min}$ ,  $YM_{max}$  – wielkości określające minimalne i maksymalne wartości dynamicznego modułu Young'a spotykane w skałach osadowych

$PR_{min}$ ,  $PR_{max}$  – wielkości określające minimalne i maksymalne wartości dynamicznego współczynnika Poisson'a spotykane w skałach osadowych

Należy tutaj zwrócić uwagę, że wskaźnik kruchości  $BRIT$  jest uproszczonym wskaźnikiem podatności skały na zabieg szczelinowania. Może być on wyznaczany przy użyciu danych pochodzących z innych rodzajów badań np. statycznych badań geomechanicznych lub petrograficznych. Dla potrzeb badań prezentowanych w tej pracy zastosowano wskaźnik odzwierciedlający zależności dynamicznych parametrów sprężystych analizowanych próbek skalnych (modułów Young'a  $E$  oraz współczynników Poisson'a  $\nu$ ). W równaniach opisujących geomechaniczny wskaźnik  $BRIT$  publikowanych

w literaturze, występują wartości stałe parametrów sprężystych, wyznaczające górne i dolne zakresy tych parametrów (Grieser i Bray, 2007; Rickman i inni, 2008). Zakresy te są zmienne w zależności od zaproponowanego przez danego autora wzoru. Na przykład dla węgla kamiennych zakresy te są znacznie węższe niż dla skał okruchowych takich jak piaskowce czy mułowce, ponieważ węgle są skałami o znacznie niższych modułach  $E$  oraz zazwyczaj wyższych  $\nu$  (Wu i inni, 2019). W niniejszej pracy zdecydowano wyznaczyć wskaźnik *BRIT* na podstawie wzoru zaproponowanego przez Grieser'a i Bray'a (2007), który posiada najszerszy zakres wartości odniesienia dla parametrów sprężystych, tj.  $YM_{min} = 0$  GPa,  $YM_{max} = 100$  GPa,  $PR_{min} = 0$ ,  $PR_{max} = 0,5$ . Wartości  $YM_{min}$  i  $PR_{min}$  równe 0 są wartościami umownymi, oznaczającymi dolny zakres odpowiednich parametrów. Ponieważ zmiana wartości odniesienia we wzorze na *BRIT* wpływa bezpośrednio na uzyskiwane wartości kruchości testowanych próbek, należy zaznaczyć, że wskaźnik *BRIT* powinien służyć jedynie jako wskazówka przy doborze technologii szczelinowania, również ze względu na to, że geometria oraz sposób propagacji szczelin nie zależy jedynie od cech sprężystych skał, ale również od innych parametrów takich jak np. magnitudy i kierunki naprężeń głównych w górotworze lub obecność naturalnych szczelin w skale.

### **3.5. Charakterystyka technologii wykonania zabiegu stymulacji wydobywania**

W celu wstępnego doboru technologii wykonania zabiegu hydraulicznego szczelinowania dedykowanej do badanych w pracy złóż niekonwencjonalnych wykorzystano:

- wyznaczone wskaźniki kruchości brittlenes (*BRIT*),
- schematy literaturowe (Chong i in., 2010; Rickman i in., 2008) przedstawione w rozdziale 2.2.1, na rysunkach 2.14 i 2.15.

Pozwoliły one na dobór płynu szczelinującego oraz rodzaju materiału podsadzkowego dla badanych formacji złożowych. Zostało to przedstawione w formie wykresów, które ilustrują dobór cieczy zabiegowej w zależności od wskaźnika kruchości skały. Na wykresach tych, wskaźnik kruchości (*BRIT*) zawiera się w przedziale od 0% do 100%, gdzie 100% oznacza najwyższą kruchość, a więc w uproszczeniu największą podatność na hydrauliczne szczelinowanie. Przy doborze rodzaju podsadzki zwrócono uwagę na rodzaj wytypowanego płynu szczelinującego oraz warunki panujące w badanej formacji złożowej.

### 3.6. Przygotowanie płynu szczelinującego

Przygotowane płyny szczelinujące do badań były identyczne ze stosowanymi do zabiegu szczelinowania badanego złoża niekonwencjonalnego. Charakteryzowały się one wszystkimi cechami o których wspomniano w rozdziale 2.2.2. Dobrano też odpowiedni łamacz i jego stężenie zapewniające upłynnienie płynu po zabiegu.

W pracy każdy płyn szczelinujący scharakteryzowano poprzez:

- jego skład,
- kompatybilność składników w temperaturze otoczenia i złożowej,
- stabilność w temperaturze otoczenia i złożowej,
- właściwości reologiczne w temperaturze złożowej.

Składniki płynu szczelinującego stanowiły środki chemiczne produkowane przez wiodące firmy na światowym i krajowym rynku materiałów chemicznych.

Test kompatybilności i stabilności płynu zabiegowego w temperaturze otoczenia i złożowej polegały na zmieszaniu wszystkich składników płynu w mikserze. Następnie przelaniu go do szklanego cylindra pomiarowego i szklanej butelki pomiarowej, obserwowano ich stabilność i kompatybilność przez okres 24 godzinach. Uzyskane wyniki opisano i przedstawiono na fotografiach.

Właściwości reologiczne płynu szczelinującego wraz z łamaczem wyznaczono w wiskozymetrze HTHP firmy Nordman. Dokładność pomiaru lepkości wynosiła 1 mPa·s.

Lepkość pozorną płynu nienewtonowskiego, będącą stosunkiem naprężenia ścinającego do szybkości ścinania wyznaczono według równania (3.13), (Economides i Nolte, 1989; API RP 13M / ISO 13503-1, 2004/2003).

$$\mu_c = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}} = K' \dot{\gamma}^{(n'-1)} \quad (3.13)$$

gdzie:

$\mu_c$  – lepkość pozorna, Pa·s

$\tau_w$  – naprężenie ścinające, Pa

$\dot{\gamma}$  – szybkość ścinania,  $s^{-1}$

$K'$  – współczynnik konsystencji, Pa·s $^{n'}$

$n'$  – współczynnik potęgowy, wartość bezwymiarowa

Test wykonano przy jednej szybkości ścinania 170  $s^{-1}$ , w temperaturze złożowej przez czas ok. 225 minut. Rejestrowano współczynnik lepkości. Współczynniki  $n'$  i  $K'$  wyznaczano co 15 minut.

Przygotowany płyn szczelinujący posłużył do nasycenia skały według procedury opisanej w rozdziale 3.8.

Z kolei płyn szczelinujący wygrzany w suszarce w temperaturze złożowej przez 24 godziny wykorzystano do nasycania kształtek skalnych użytych do laboratoryjnej symulacji zjawiska embedmentu.

### **3.7. Przygotowanie materiału podsadzkowego**

Przygotowanie materiału podsadzkowego polegało na wyznaczeniu podstawowych właściwości według norm ISO 13503-2:2006E (2006) i PN-EN ISO 13503-2 (2010) oraz aneksu normy ISO 13503-2:2006/Amd.1:2009E (2009). Miało to na celu sprawdzenie czy wytypowany do badań materiał może być stosowany jako podsadzka do zabiegu hydraulicznego szczelinowania złóż.

Do podstawowych właściwości podsadzki należą: skład granulometryczny, średnia średnica ziaren  $d_{av}$ , kształt ziaren (tj. krągłość i kulistość), rozpuszczalność w kwasie (12%HCl:3%HF), zawartości zanieczyszczeń, gęstość nasypowa, gęstość pozorna, gęstość absolutna, ubytek masy w wyniku wypalania powlekanego żywicą materiału podsadzkowego, wytrzymałość na naprężenia ściskające (klasa wytrzymałości na ściskanie).

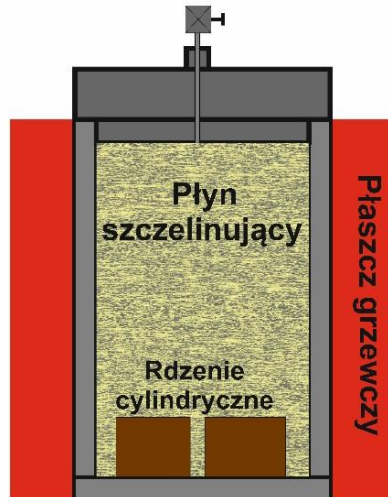
Do badań użyto podsadzkę produkowaną i dostarczaną przez wiodącą na rynku światowym firmę. Wyznaczono dla niej powyższe wielkości, a następnie sprawdzono ich zgodność z kryteriami zawartymi w normie.

Dla późniejszej analizy zjawiska embedmentu oraz jego wpływu na efektywność podsadzenia szczeliny, zwrócono szczególną uwagę na niektóre podstawowe właściwości podsadzki tj. skład granulometryczny, średnią średnicę ziaren oraz kształt ziaren.

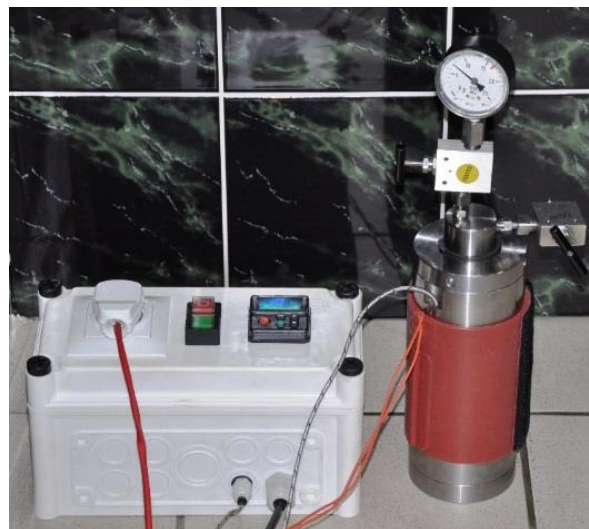
Przygotowany materiał podsadzkowy posłużył do wypełnienia sztucznie wytworzonej szczeliny w warunkach laboratoryjnych według procedury opisanej w rozdziale 3.9.

### 3.8. Nasywanie próbek skały w płynie zabiegowym

Nasywanie skały w płynie zabiegowym wykonano według schematu pokazanego na rysunku 3.2 w zbiorniku wysokociśnieniowym i wysokotemperaturowym (Rys. 3.3).



Rys. 3.2 Schemat nasycania skały w płynie szczelinującym

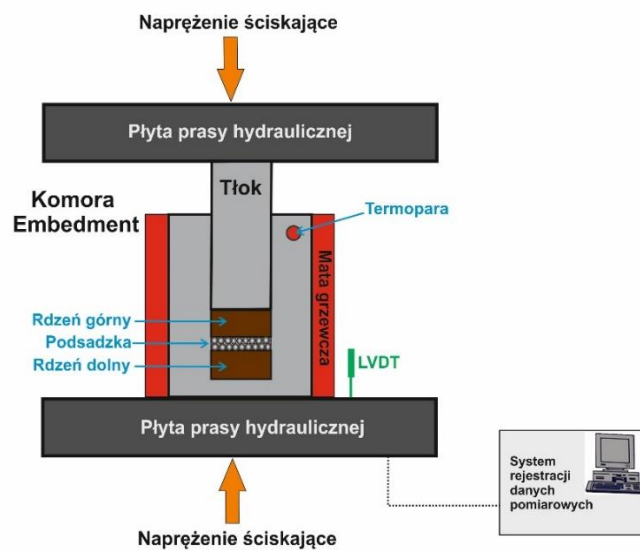


Rys. 3.3 Stanowisko do nasycania skały w płynie zabiegowym, zaprojektowane i wykonane w INiG-PIB

Polegało ono na umieszczeniu rdzeni cylindrycznych w zbiorniku wypełnionym płynem szczelinującym. Następnie po podgrzaniu płynu do zadanej temperatury, nasycano skałę pod ciśnieniem 6,9 MPa.

### 3.9. Laboratoryjna symulacja zjawiska wgniatania ziaren podsadzki w skałę złożową oraz warunki jej wykonania

W celu prawidłowego wykonania laboratoryjnej symulacji zjawiska embedmentu, wytworzono sztucznie szczelinę wypełnioną podsadzką, częściowo odwzorowując ideę szczeliny wytworzonej w zabiegu stymulacyjnym (Rys. 1.13). Rdzeń dolny i górny reprezentowały dwie ściany szczeliny (odwzorowujące ściany szczeliny, zobrazowane na rysunku 2.13). Symulacje wykonano według schematu przedstawionego na rysunku 3.4 w prasie hydraulicznej (Rys. 3.5).



**Rys. 3.4** Schemat stanowiska badawczo-pomiarowego do laboratoryjnej symulacji zjawiska wgniatania ziaren podsadzki w ścianę szczeliny



**Rys. 3.5** Stanowisko do symulacji zjawiska wgniatania ziaren podsadzki w ścianę szczeliny (Embedment), w INiG-PIB

Prasa hydrauliczna została dodatkowo wyposażona w szczelinomierz elektroniczny LVDT (ang. *Linear Variable Differential Transformer*). Umożliwia on pomiar zmian

wysokościowych płyt prasy. Zakres pomiaru LVDT jest rzędu 2 cm, a dokładność pomiaru wynosi 0,001 cm.

Masę podsadzki potrzebną do wypełnienia szczeliny dla uzyskania zadanej koncentracji powierzchniowej określono według równania (3.14), (ISO 13503-5, 2006; PN-EN ISO 13503-5, 2009).

$$m_p = A_f \cdot 10^{-1} \cdot C \quad (3.14)$$

gdzie:

$m_p$  – masa podsadzki, g

$C$  – koncentracja powierzchniowa podsadzki,  $kg/m^2$

$A_f$  – pole powierzchni ściany szczeliny,  $cm^2$

Pole powierzchni ściany szczeliny  $A_f$  określono według równania (3.15).

$$A_f = \frac{\pi \cdot d_w^2}{4} \quad (3.15)$$

gdzie:

$d_w$  – wewnętrzna średnica komory embedment,  $cm$

Odważoną podsadzkę  $m_p$  umieszczono wewnątrz cylindrycznej komory Embedment (Rys. 3.5) pomiędzy dwoma powierzchniami czołowymi suchych lub wstępnie nasyconych w płynie szczelinującym cylindrycznych rdzeni o średnicy odpowiadającej wewnętrznej średnicy  $d_w$  komory równej 2,54 cm, według schematu pokazanego na rysunku 3.4.

Tak przygotowaną komorę zamykano powoli tłokiem, a następnie po umieszczeniu jej w prasie hydraulicznej podgrzewano do zadanej temperatury złożowej i poddawano działaniu naprężenia ściskającego. Skala była ściskana w komorze tylko w kierunku pionowym. Wartość zadanej temperatury wyznaczono według równania (3.1). Z kolei wielkość zadanego naprężenia odpowiadała ciśnieniu efektywnemu  $P_{ef}$ , równemu ciśnieniu zamknięcia szczeliny  $P_z$ . Wartość  $P_{ef}$  wyznaczono według równania (3.2). Natomiast głębokość  $H_z$  użyta do wyznaczenia temperatury i ciśnienia, odpowiadała średniej głębokości zalegania badanej formacji złożowej.

Siłę potrzebną do wytworzenia zadanego naprężenia ściskającego szczelinę w komorze Embedment określono zgodnie z procedurami opisanymi w normach: ISO 13503-2:2006(E) (2006) i PN-EN ISO 13503-2 (2010).



Do zadanej wielkości ciśnienia efektywnego działającego na szczelinę i podsadzkę dochodząco ze stałą prędkością równą 3,45 MPa/min, tj. zgodnie z normą API RP 61 (1989). Po osiągnięciu tej wartości, utrzymywano ją przez 6 godzin, a następnie powoli zmniejszono naprężenie. Podczas testów rejestrowano zmiany rozwarości warstwy szczeliny przy użyciu szczelinościomierza LVDT zainstalowanego w prasie hydraulicznej (Rys. 3.4 i 3.5). Pozwalało to na obserwację momentu stabilizacji rozwarości szczeliny.

Badania wykonano zarówno dla skały suchej, jak i nasyconej płynem szczelinującym.

### 3.10. Obrazowanie powierzchni ścian szczeliny

Zarówno przed, jak i po wykonanej laboratoryjnej symulacji zjawiska embedmentu fotografowano całą powierzchnię czołową rdzeni w wymiarze 2D. Z kolei wytypowaną część jej powierzchni analizowano w wymiarze 3D. Do tego celu wykorzystano mikroskop optyczny (Rys. 3.6) wyposażony w kamerę wykonaną w technologii CCD oraz w specjalistyczne oprogramowanie Panasis.

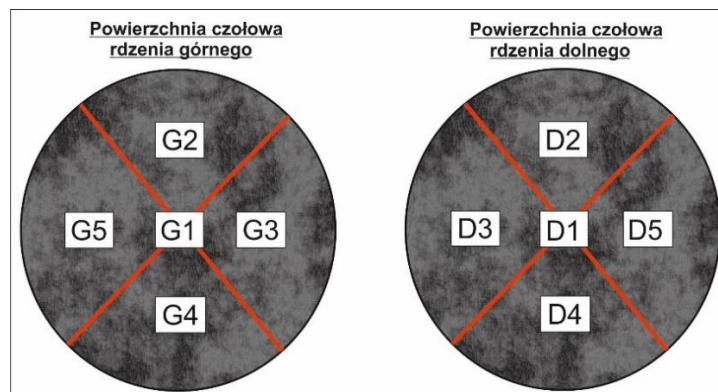


**Rys. 3.6** Mikroskop optyczny HMR-300 3D Profiler firmy Huvitz, w INiG-PIB

Dokładność pomiaru współrzędnych dla osi X i Y dla użytych w analizach obiektywów wyniosła: 5x (2,24  $\mu\text{m}$ ), 10x (1,12  $\mu\text{m}$ ), 20x (0,75  $\mu\text{m}$ ), 50x (0,42  $\mu\text{m}$ ), 100x (0,37  $\mu\text{m}$ ) oraz dla osi Z (0,1  $\mu\text{m}$ ).

Obrazowanie powierzchni skały w wymiarze 2D i 3D pozwoliło na cyfrowe i topograficzne przedstawienie powierzchni skały oraz jej analizę. Ze względu na zastosowanie obiektywów o większych powiększeniach do obrazowania powierzchni skały w wymiarze 3D, konieczne było zawężenie powierzchni analizowanego mniejszego obszaru. Tym samym przeanalizowano większą ilość mniejszych pojedynczych obszarów powierzchni czołowych rdzeni.

Sposób rozmieszczenia analizowanych obszarów rdzeni przedstawiono na poniższym schemacie (Rys. 3.7).



**Rys. 3.7** Schemat rozmieszczenia obrazowanych i analizowanych mniejszych obszarów na powierzchniach czołowych rdzeni

Powierzchnie czołowe rdzeni wykorzystano do analizy obszaru szczeliny wytworzonej sztucznie w warunkach laboratoryjnych, częściowo odwzorowującej ideę szczeliny wytworzonej w zabiegu stymulacyjnym.

Dodatkowo wykonane było obrazowanie powierzchni czołowych rdzeni w skaningowym mikroskopie elektronowym (Rys. 3.8), wyposażonym w polowy emiter elektronów (FEG - *field emission gun*) i analizator dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych (EBSD). Zdjęcia skał zostały wykonane przy użyciu detektora elektronów wstecznie rozproszonych (BSE). Mikroskop pracował w następujących warunkach: natężenie prądu  $8 \div 10$  nA, napięcie 20 kV, redukcja ciśnienia w komorze próżniowej 50 Pa, średnica wiązki  $9,3 \div 10,9$  mm, próbki nienapylane. Do identyfikacji widm wykorzystano rozkład widmowy funkcji „*halographic peak deconvolution*”.

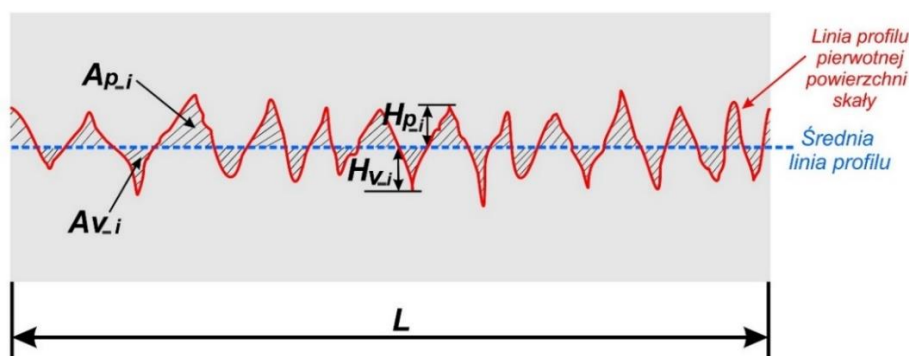


**Rys. 3.8** Mikroskop elektronowy Quanta 650 FEG firmy FEI, w Instytucie Czystych Technologii w Ostrawie

W przypadku każdej ze skał obserwowano powierzchnię w stanie naturalnym, tj. przed eksperymentem oraz po przeprowadzeniu eksperymentu dotyczącego laboratoryjnej symulacji omawianego zjawiska. Badania wykonano w Instytucie Czystych Technologii w Ostrawie.

### 3.11. Metodyka wyznaczenia chropowatości powierzchni ściany szczeliny

Wyznaczenie chropowatości pierwotnej powierzchni skały złożowej polegało na zobrazowaniu powierzchni czołowej każdego z rdzeni, według procedury przedstawionej w rozdziale 3.10. Dla każdego z obszarów wyznaczono po trzy odcinki pomiarowe profilu chropowatości powierzchni. Łącznie dla pięciu obszarów wytypowanych dla każdego z rdzeni wyznaczono po piętnaście odcinków pomiarowych. Analizę odcinka pomiarowego profilu wykonano według idei przedstawionej na rysunku 3.9 (Masłowski, 2015).



**Rys. 3.9** Analiza profilu chropowatości powierzchni (objaśnienia symboli – w tekście), (Masłowski, 2015; zmienione)

Położenie średniej linii profilu chropowatości powierzchni skały musiało spełniać warunek przedstawiony równaniem (3.16), zgodnie z normą PN-EN ISO 4287 (1999).

$$\sum_{i=1}^{n_v} A_{v,i} = \sum_{i=1}^{n_p} A_{p,i} \quad (3.16)$$

gdzie:

$A_{v,i}$  – indywidualne pole powierzchni pomiędzy krzywą wgłębień a średnią linią profilu,  $mm^2$

$A_{p,i}$  – indywidualne pole powierzchni pomiędzy krzywą wzniesień a średnią linią profilu,  $mm^2$

$n_v$  – liczba wszystkich wgłębień, wartość bezwymiarowa

$n_p$  – liczba wszystkich wzniesień, wartość bezwymiarowa

Średnia wartość chropowatości  $R_a$  pierwotnej powierzchni skały była wyznaczana wzdłuż całkowitego odcinka pomiarowego  $L_c$  składającego się z poszczególnych odcinków wytypowanych na danych obrazowanych obszarach, według równania (3.17), zgodnie z normą PN-EN ISO 4287 (1999).

$$R_a = \frac{\sum_{i=1}^{n_v} H_{v,i} + \sum_{i=1}^{n_p} H_{p,i}}{n_v + n_p} \quad (3.17)$$

gdzie:

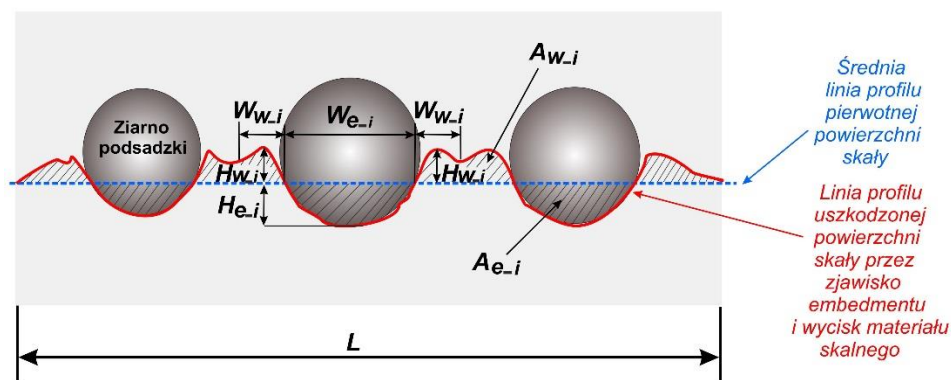
$H_{v,i}$  – indywidualna głębokość „wgniebień”, *mm*

$H_{p,i}$  – indywidualna wysokość „wzniesień”, *mm*

Pomiar chropowatości całej powierzchni czołowej rdzenia pozwolił potwierdzić, że są one powtarzalnie przygotowane do badań, zapewniające prawidłową ocenę uzyskanych wyników zjawiska embedmentu.

### **3.12. Metodyka wyznaczenia wielkości charakteryzujących zjawisko embedmentu**

Wyznaczenie wielkości charakteryzujących zjawiska wgniatania ziaren podsadzki w skałę złożową i wycisków materiału skalnego pochodzącego z wgnieceń polegało na zobrazowaniu powierzchni czołowej dla każdego z rdzeni, według procedury przedstawionej w rozdziale 3.10. Pozwalało to określić uszkodzenie powierzchni skały przez ziarna podsadzki. Uwzględniono wgniecenia powstałe wskutek wgniatania ziaren podsadzki w powierzchnię skały oraz wyciski materiału skalnego z powstałych wgnieceń. Założono podobne umiejscowienie obszarów wytypowanych podczas wyznaczania pierwotnej chropowatości (Rys. 3.7). Dla każdego z obszarów wyznaczono po cztery odcinki pomiarowe profilu powierzchni. Łącznie dla pięciu obszarów wytypowanych dla każdego rdzenia wyznaczono dwadzieścia odcinków pomiarowych. Analizę odcinka pomiarowego profilu wykonano według idei przedstawionej na rysunku 3.10 (Masłowski, 2015; Masłowski i Labus, 2021).



**Rys. 3.10** Analiza profilu powierzchni uszkodzonej przez ziarna podsadzki (objaśnienia symboli – w tekście), (Masłowski, 2015; Masłowski i Labus, 2021; zmienione)

Położenie średniej linii profilu uszkodzonej powierzchni skały przez wgniecenia i wyciski materiału skalnego określano w podobny sposób, jak w przypadku chropowatości pierwotnej powierzchni skały. Tym samym spełniało to warunek przedstawiony równaniem (3.18), (Masłowski, 2015; Masłowski i in., 2018a, 2021).

$$\sum_{i=1}^{n_e} A_{e-i} = \sum_{i=1}^{n_w} A_{w-i} \quad (3.18)$$

gdzie:

$A_{e-i}$  – indywidualne pole powierzchni pomiędzy krzywą wgnieceń ziaren podsadzki w pierwotną powierzchnię skały a średnią linią profilu,  $mm^2$

$A_{w-i}$  – indywidualne pole powierzchni pomiędzy krzywą wycisku materiału skalnego a średnią linią profilu,  $mm^2$

$n_e$  – liczba wszystkich wgnieceń, *wartość bezwymiarowa*

$n_w$  – liczba wszystkich wycisków, *wartość bezwymiarowa*

Dla określenia zjawiska wgniatania ziaren podsadzki w skałę złożową, wyznaczono między innymi:

- Średnią głębokość  $H_{ew}$  wgniecenia ziaren podsadzki w ścianę szczeliny z uwzględnieniem wysokości wycisku materiału skalnego, wyznaczano według równania (3.19)

$$H_{ew} = H_e + H_w \quad (3.19)$$

gdzie:

$H_e$  – średnia głębokość wgniecenia ziaren podsadzki w pierwotną powierzchnię skały, wyznaczona dla profilu wzdłuż całkowitego odcinka pomiarowego składającego się z pojedynczych odcinków na analizowanym obszarze, według równania (3.20)

$$H_e = \frac{\sum_{i=1}^{n_e} H_{e,i}}{n_e} \quad (3.20)$$

$H_{e,i}$  – indywidualna głębokość wgniecenia ziarna podsadzki w pierwotną powierzchnię skały, *mm*

$H_w$  – średnia wysokość wycisku materiału skalnego pochodzącego z wgnieceń ziaren podsadzki w skałę powstałych na pierwotnej powierzchni skały wyznaczona dla profilu, wzdłuż całkowitego odcinka pomiarowego składającego się z pojedynczych odcinków na analizowanym obszarze, według równania (3.21)

$$H_w = \frac{\sum_{i=1}^{n_w} H_{w,i}}{n_w} \quad (3.21)$$

$H_{w,i}$  – indywidualna wysokość wycisku materiału skalnego z wgniecenia ziarna podsadzki w skałę, *mm*

- Średnią szerokość  $W_{ew}$  wgniecenia ziarna podsadzki w ścianę szczeliny z uwzględnieniem szerokości wycisku materiału skalnego, wyznaczano według równania (3.22)

$$W_{ew} = W_e + W_w \quad (3.22)$$

gdzie:

$W_e$  – średnia szerokość wgniecenia ziarna podsadzki w pierwotną powierzchnię skały, wyznaczona według równania (3.23)

$$W_e = \frac{\sum_{i=1}^{n_e} W_{e,i}}{n_e} \quad (3.23)$$

$W_{e,i}$  – indywidualna szerokość wgniecenia ziarna podsadzki w pierwotną powierzchnię skały, *mm*

$W_w$  – średnia szerokość wycisku materiału skalnego pochodzącego z wgniecenia ziarna podsadzki w powierzchnię skały, wyznaczona według równania (3.24)

$$W_w = 2 \cdot \frac{\sum_{i=1}^{n_w} W_{w,i}}{n_w} \quad (3.24)$$

$W_{w,i}$  – indywidualna szerokość wycisku materiału skalnego pochodzącego z wgniecenia ziarna podsadzki w powierzchnię skały, *mm*

- Procentowe uszkodzenie  $PUS_{ew}$  powierzchni czołowej rdzenia (odwzorowujące ściany szczeliny) spowodowane przez wgniecenia ziaren podsadzki z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego z wgnieceń, wyznaczano według równania (3.25), wyrażone w %.

$$PUS_{ew} = PUS_e + PUS_w \quad (3.25)$$

gdzie:

$PUS_e$  – procentowe uszkodzenie powierzchni skały spowodowane przez wgniecenia ziaren podsadzki, wyznaczone według równania (3.26).

$$PUS_e = \frac{\sum_{i=1}^{n_e} W_{e,i}}{L_c} \cdot 100 \% \quad (3.26)$$

$L_c$  – całkowita długość odcinka pomiarowego składającego się z pojedynczych odcinków z danych obszarów wytypowanych dla całej powierzchni czołowej rdzenia, *mm*

$PUS_w$  – procentowe uszkodzenie powierzchni skały spowodowane przez wyciski materiału skalnego pochodzącego z wgnieceń ziaren podsadzki, wyznaczone według równania (3.27).

$$PUS_w = \frac{\sum_{i=1}^{n_w} W_{w,i}}{L_c} \cdot 100 \% \quad (3.27)$$

Dodatkowo wyznaczono:

- Średnią głębokość  $H_{ew\_sr}$  wgniecenia ziaren podsadzki w ściany szczeliny wraz z wysokością wycisków materiału skalnego z tych wgnieceń, wyznaczoną według równania (3.28)

$$H_{ew\_sr} = H_{e\_sr} + H_{w\_sr} \quad (3.28)$$

gdzie:

$H_{e\_sr}$  – średnia głębokość wgnieceń ziaren podsadzki w powierzchnię czołową górnego i dolnego rdzenia, wyznaczona według równania (3.20), *mm*

$H_{w\_sr}$  – średnia wysokość wycisku materiału skalnego pochodzącego z wgnieceń ziaren na powierzchni czołowej górnego i dolnego rdzenia, wyznaczona według równania (3.21), *mm*

- Średnią szerokość  $W_{ew\_sr}$  wgniecenia ziaren podsadzki w ściany szczeliny (skałę) z uwzględnieniem szerokości wycisku materiału skalnego, wyznaczoną według równania (3.29)

$$W_{ew\_sr} = W_{e\_sr} + W_{w\_sr} \quad (3.29)$$

gdzie:

$W_{e\_sr}$  – średnia szerokość wgniecenia ziaren podsadzki w pierwotną powierzchnię skały, wyznaczona według równania (3.23)

$W_{w\_sr}$  – średnia szerokość wycisku materiału skalnego pochodzącego z wgniecenia ziaren podsadzki, wyznaczona według równania (3.24)

### **3.13. Metodyka analizy otrzymanych wyników badań pod kątem efektywności podsadzenia szczeliny w zabiegach stymulacyjnych**

Dla sprawdzenia powtarzalności przygotowania powierzchni czołowych rdzeni wyznaczono wartości pierwotnej chropowatości  $R_a$ . Rdzenie odwzorowywały ściany szczeliny w warunkach laboratoryjnych, która charakteryzowała się średnią chropowatością  $R_{a\_sr}$ . Wartości chropowatości wyznaczono według metodyki opisanej w rozdziale 3.11.

Kolejno wyznaczono wielkości charakteryzujące zjawiska embedmentu i wycisku materiału skalnego dla szczeliny, według metodyki opisanej w rozdziale 3.12. Posłużyły one do określenia między innymi:

- Całkowitej głębokości  $H_{ew\_c}$  wgniecen ziaren podsadzki w ściany szczeliny wraz z wysokością wycisków materiału skalnego z tych wgniecen, wyznaczona według równania (3.30)

$$H_{ew\_c} = H_{ew.G} + H_{ew.D} \quad (3.30)$$

gdzie:

$H_{ew.G}$  – średnia głębokość wgniecenia ziaren podsadzki w skałę z uwzględnieniem wysokości wycisków materiału skalnego z wgniecen ziaren podsadzki w powierzchnię czołową górnego rdzenia, według równania (3.19), *mm*

$H_{ew.D}$  – średnia głębokość wgniecenia ziaren podsadzki w skałę z uwzględnieniem wysokości wycisków materiału skalnego z wgniecen ziaren podsadzki w powierzchnię czołową dolnego rdzenia, według równania (3.19), *mm*

- Średniego procentowego uszkodzenia  $PUS_{e\_sr}$  powierzchni ścian szczeliny spowodowane przez wgniecenia ziaren podsadzki w skałę, wyznaczone według równania (3.26)



- Średniego procentowego uszkodzenia  $PUS_{ew_{sr}}$  powierzchni ścian szczeliny spowodowane przez wgniecenia ziaren podsadzki w skałę i wycisk materiału skalnego, wyznaczone według równania (3.25)

Na efektywność przepływu węglowodorów poprzez warstwę podsadzki wpływają zarówno głębokość wgniecení ziaren podsadzki w skałę oraz wysokość wycisków materiału skalnego. Związane jest to z efektywną rozwartością warstwy podsadzki  $W_{f.ef}$  oraz procentową efektywną rozwartością szczeliny  $PEWF$ . Z kolei wgniecenia ziaren w skałę mają wpływ na uszkodzenie powierzchni skały. Tym samym ograniczają przestrzeń porową dostępną dla przyływu węglowodorów ze skały do szczeliny. Związane jest to z efektywną powierzchnią ściany szczeliny  $PEPS$ .

- **Efektywna rozwartość szczeliny**  $W_{f.ef}$  wypełnionej materiałem podsadzkowym została wyznaczona według równania (3.31)

$$W_{f.ef} = W_{fm} - H_{ew_c} \quad (3.31)$$

gdzie:

$W_{fm}$  – maksymalna rozwartość szczeliny wypełnionej podsadzką, bez wystąpienia zjawiska wgniecenia ziaren podsadzki w ściany szczeliny i wycisków materiału skalnego pochodzących z wgniecení, *mm*

Należy tutaj zaznaczyć, że maksymalną do uzyskania rozwartość  $W_{fm}$  szczeliny wypełnionej podsadzką (odpowiadającą użytej do testu koncentracji powierzchniowej podsadzki) bez wystąpienia uszkodzenia powierzchni ściany szczeliny określono według procedury użytej do badań dla rdzeni skalnych. Natomiast w badaniu tym zamiast skały zastosowano stalowe kształtki cylindryczne. Charakteryzowały się one twardością stali większą od 43 w skali C Rockwella (HRC). Prasę hydrauliczną dodatkowo wyposażono w szczelinościomierz *LVDT* (Rys. 3.4). Warunki wykonania badania były takie same jak w przypadku zastosowania rdzeni. Przez cały czas badania mierzono rozwartość  $W_{fm}$  szczeliny wypełnionej materiałem podsadzkowym pomiędzy dwoma rdzeniami za pomocą szczelinościomierza *LVDT*. W jego wskazaniach uwzględniono wielkość odkształcenia prasy hydraulicznej, komory pomiarowej oraz stalowych kształtek cylindrycznych, przy zadanych warunkach naprężenia ściskającego i temperatury. Uwzględnione zostały tutaj niekorzystne czynniki, takie jak: naprężenie ściskające, temperatura, kruszenie i reorientacja ziaren oraz czas ich działania na warstwę podsadzki.

- Procentowa efektywna rozwartość szczeliny z podsadzką  $PEWF$  została wyznaczona według równania (3.32) z uwzględnieniem wgnieceń ziaren podsadzki w skałę i wycisków materiału skalnego pochodzących z wgnieceń

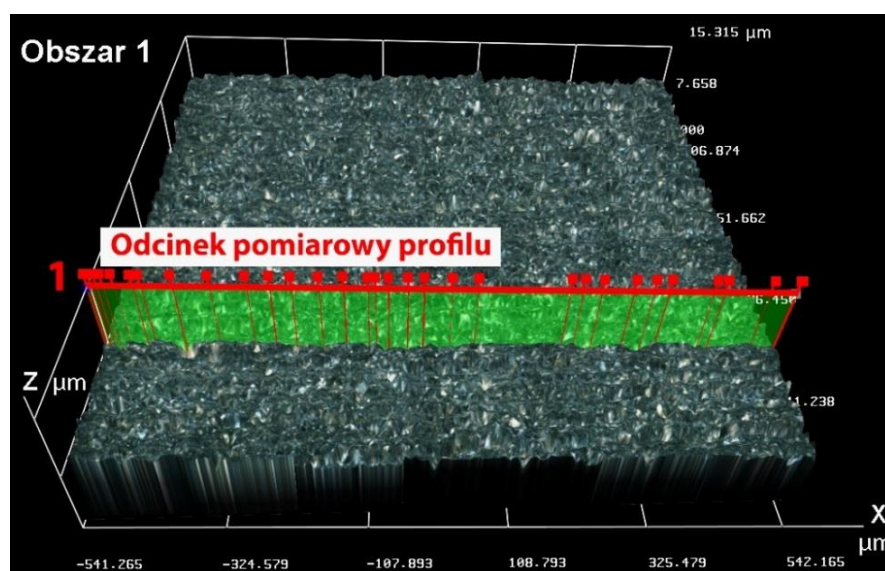
$$PEWF = 100 \% - \left( \frac{W_{fm} - W_{f.ew}}{W_{fm}} \cdot 100 \% \right) \quad (3.32)$$

- Procentowa efektywna powierzchnia ściany szczeliny  $PEPS$  dostępna dla przepływu węglowodorów ze skały do szczeliny, została wyznaczona według równania (3.33)

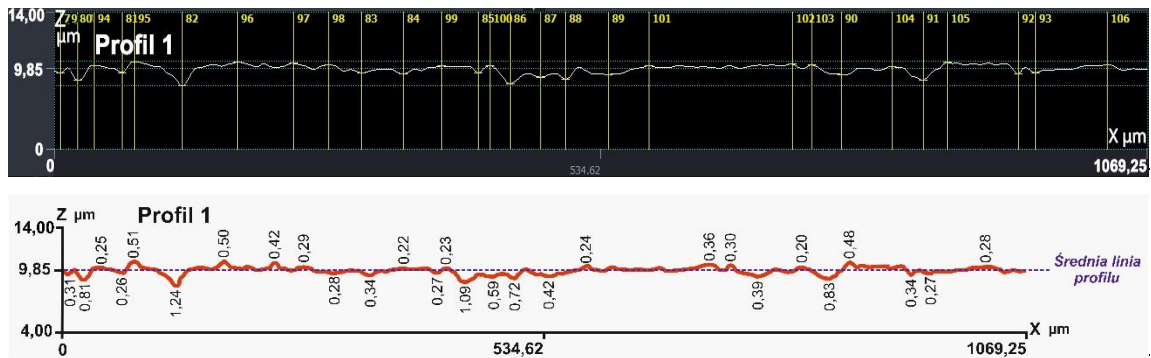
$$PEPS = 100 \% - PUS_{e, sr} \quad (3.33)$$

### 3.14. Sposób wykonania obrazowania powierzchni skały wraz z analizą

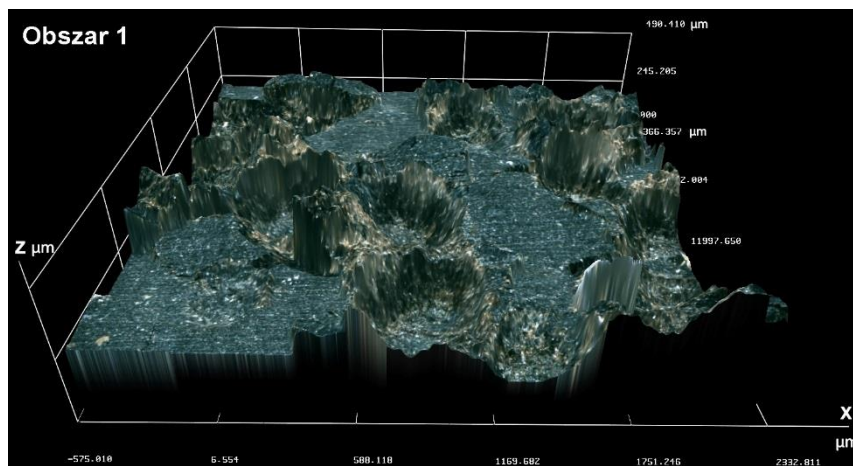
Przykład obrazowania pierwotnej powierzchni skały w wymiarze 3D przedstawiono dla jednego z kilku obszarów wytypowanych na powierzchni czołowej rdzenia wraz z analizą profilu chropowatości (Rys. 3.11 i 3.12). Wykonano je przed laboratoryjną symulacją zjawiska embedmentu. Z kolei obrazowania 3D powierzchni czołowej rdzenia dla jednego obszaru wraz z analizą jednego odcinka pomiarowego profilu wgnieceń ziaren podsadzki w skałę i wycisków materiału skalnego, po laboratoryjnej symulacji zjawiska embedmentu, przedstawiono na rysunkach 3.13, 3.14 i 3.15.



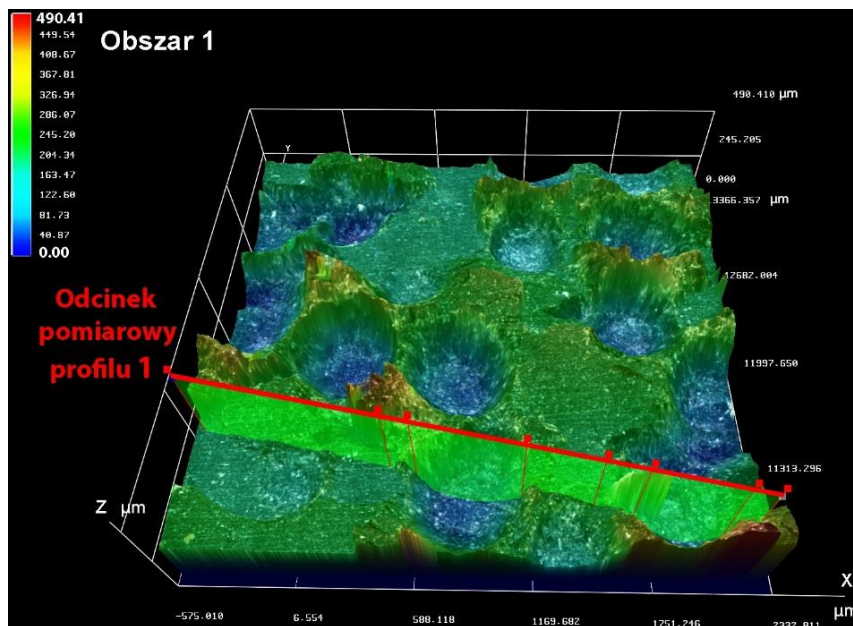
Rys. 3.11 Obraz pierwotnej powierzchni czołowej górnego rdzenia w obszarze 1 (test4), wraz z wyznaczeniem jednego z odcinków pomiarowych profilu



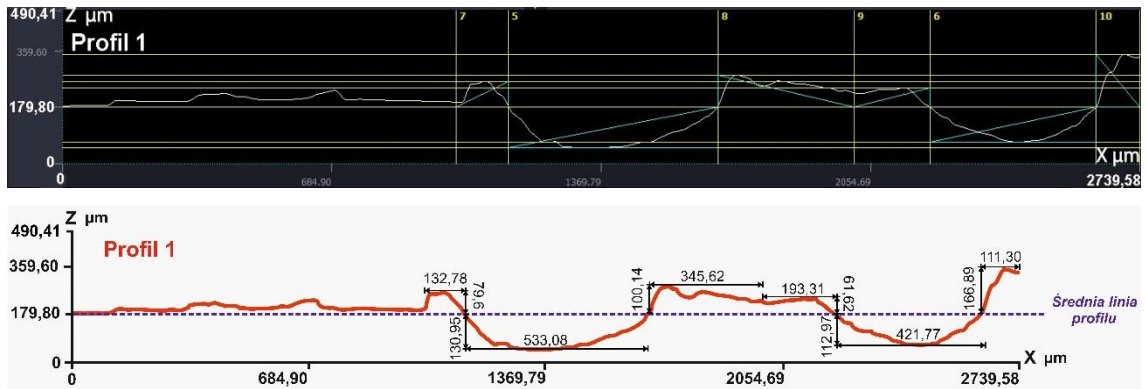
**Rys. 3.12** Analiza odcinka pomiarowego profilu w obszarze w celu wyznaczenia chropowatości pierwotnej powierzchni czołowej górnego rdzenia w obszarze 1 (test 4). (Gdzie: oś Z odpowiada głębokościom wgłębień  $H_{v_i}$  i wysokościami wzniesień  $H_{p_i}$ , a oś X odpowiada długości odcinka pomiarowego profilu  $L_i$ )



**Rys. 3.13** Obraz powierzchni czołowej górnego rdzenia w obszarze 1 (test 4)



**Rys. 3.14** Obraz powierzchni czołowej górnego rdzenia w obszarze 1 (test 4), wraz z wyznaczeniem jednego z odcinków pomiarowych profilu



**Rys. 3.15** Analiza odcinka pomiarowego profilu w celu wyznaczenia wielkości charakteryzujących zjawisko embedmentu i wycisku materiału skalnego dla górnego rdzenia w obszarze 1 (test 4). (Gdzie: oś Z odpowiada głębokości wgnieć ziaren podsadzki  $H_{e_i}$  i wysokości wycisków materiału skalnego  $H_{w_i}$ , a oś X odpowiada szerokości wgnieć  $W_{e_i}$  i wycisków  $W_{w_i}$  oraz długości odcinka pomiarowego profilu  $L_i$ )

#### 4. Laboratoryjna symulacja zjawiska embedmentu

Badania przeprowadzono przy użyciu urządzeń i zgodnie z metodyką przedstawioną w poprzednich rozdziałach pracy.

Materiał badawczy stanowiły próbki skał, pochodzące z otworów wiertniczych, reprezentujące dwa wybrane typy złóż niekonwencjonalnych. Poniżej zamieszczono ich szczegółowy opis; w dalszej części pracy, dla uproszczenia, skały te będą nazywane „piaskowcem” i „łupkiem”.

Próbka piaskowca pochodziła z otworu wiertniczego (z głębokości 3800 m), zlokalizowanego w obrębie strefy poznańsko-kaliskiej. Piaskowiec ten reprezentuje skałę złożową typu zamkniętego „tight gas”. Pod względem stratygraficznym należy do czerwonego spągowca (permu).

Z kolei próbkę łupka stanowiła skała reprezentująca laminowane czarne i ciemnoszare iłowce oraz mułowce bitumiczne dla obszaru basenu bałtyckiego i regionu lubelskiego. Pobrana została z otworu wiertniczego (z głębokości 3685 m), w strefie Kartuzy-Szemud. Skała ta należała do tzw. ogniwa iłowców bitumicznych z Jantaru; stratygraficznie do Landoweru (sylur dolny).

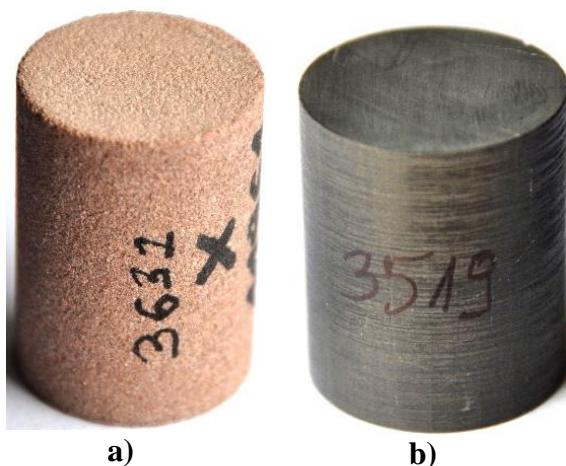
Zakres głębokości występowania powyższych formacji i wynikające z tego wartości temperatur  $T$  oraz efektywnych ciśnień  $P_{ef}$  działających na szczelinę i podsadzkę, spowodowanych przez minimalne naprężenia poziome  $\sigma_h$ , przedstawiono w tabeli 4.1.

**Tabela 4.1** Warunki geologiczno-złożowe dla wytypowanych złóż niekonwencjonalnych

Parametry złoża niekonwencjonalnego	Formacja piaskowcowa typu zamkniętego	Formacja łupkowa (iłowcowo-bitumiczna)
Głębokość zalegania złoża, $m$ Zakres / <u>wartość średnia</u>	3500 ÷ 5000 <b><u>4250</u></b>	2740 ÷ 3695 <b><u>3218</u></b>
Temperatury złożowe, $^{\circ}C$ Zakres / <u>wartość średnia</u>	105 ÷ 150 <b><u>127,5</u></b>	82,2 ÷ 110,9 <b><u>96,5</u></b>
Efektywne ciśnienie $P_{ef}$ działające na szczelinę i podsadzkę, $MPa$ Zakres / <u>wartość średnia</u>	71,2 ÷ 101,8 <b><u>86,5</u></b>	55,8 ÷ 75,2 <b><u>65,5</u></b>

#### 4.1. Opis petrograficzny wytypowanych skał

Piaskowiec (Rys. 4.1a) jest skałą o czerwonej barwie, strukturze psamitowej, średnioziarnistej. Charakteryzuje się dobrym stopniem wysortowania i obtoczenia ziarn. Na podstawie analizy XRD w składzie mineralnym stwierdzono obecność kwarcu (73,3%), skaleni (plagioklasy 4,4 %, skalenie potasowe 8,4 %), a także minerałów ilastych (lub mik, 6,5%), dolomitu (3,8%), anhydrytu (1,4%) i hematytu (2,2%). Skałę tą można zaklasyfikować jako arenit kwarcowo-skaleniowy o spoiwie ilasto-węglanowo-siarczanowo-żelazistym.

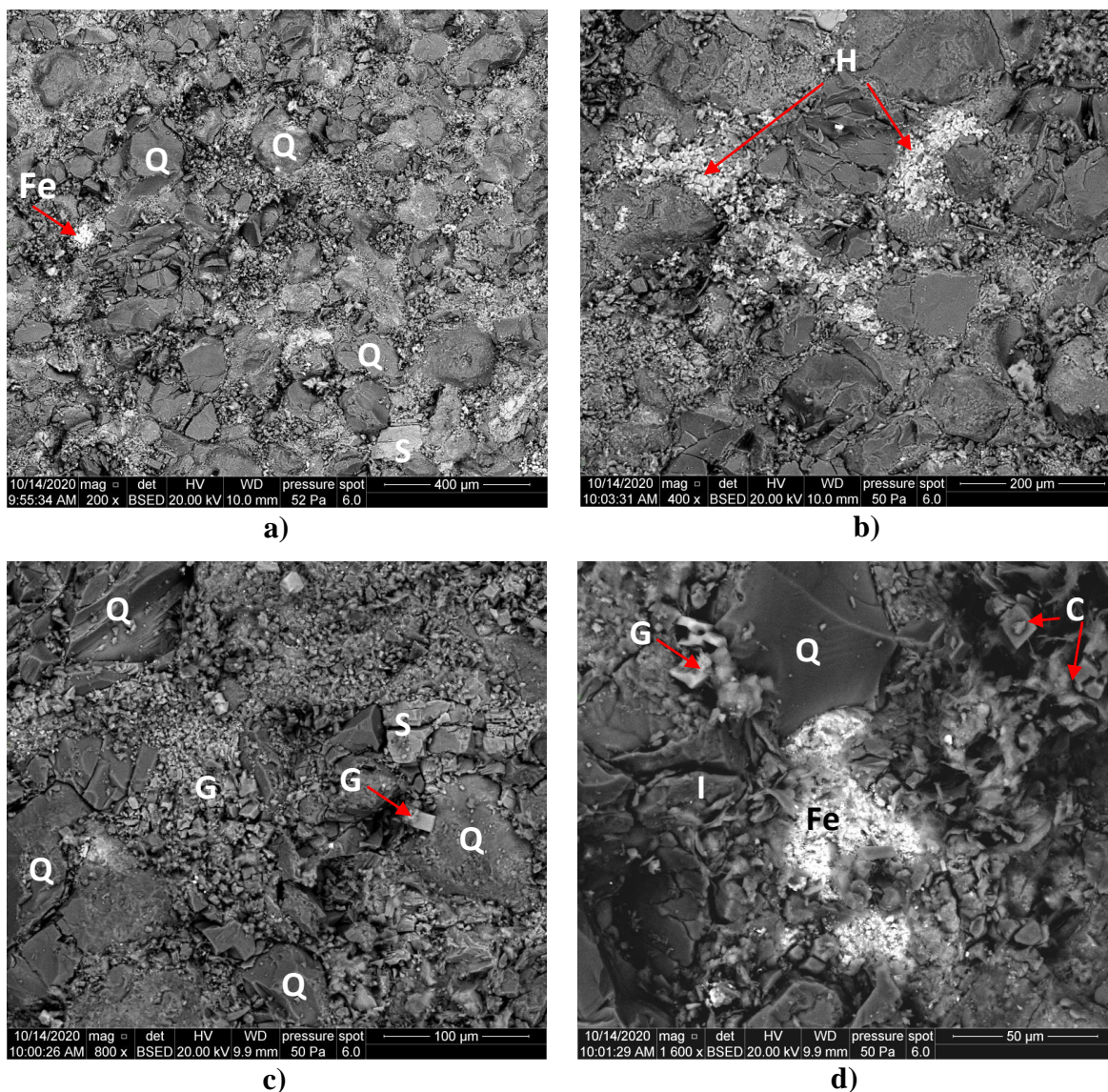


**Rys. 4.1** Próbki wybranych skał: a) piaskowiec, b) łupek

Analiza mikroskopowa SEM badanych skał, przed przeprowadzeniem eksperymentów, pozwoliła na uzyskanie dodatkowych informacji o ich strukturze i składzie mineralnym (Rys. 4.2 i 4.3).

Na rysunku 4.2 widać, iż w szkielecie ziarnowym dominują ziarna kwarcu (Q), sporadycznie natomiast pojawiają się ziarna skaleni (S). W spoiwie piaskowca występują również minerały środowiska ewaporatowego: węglany (kalcyt - C i dolomit), baryt, halit (H), gips (G), a także tlenki żelaza (Fe) i minerały ilaste (I).

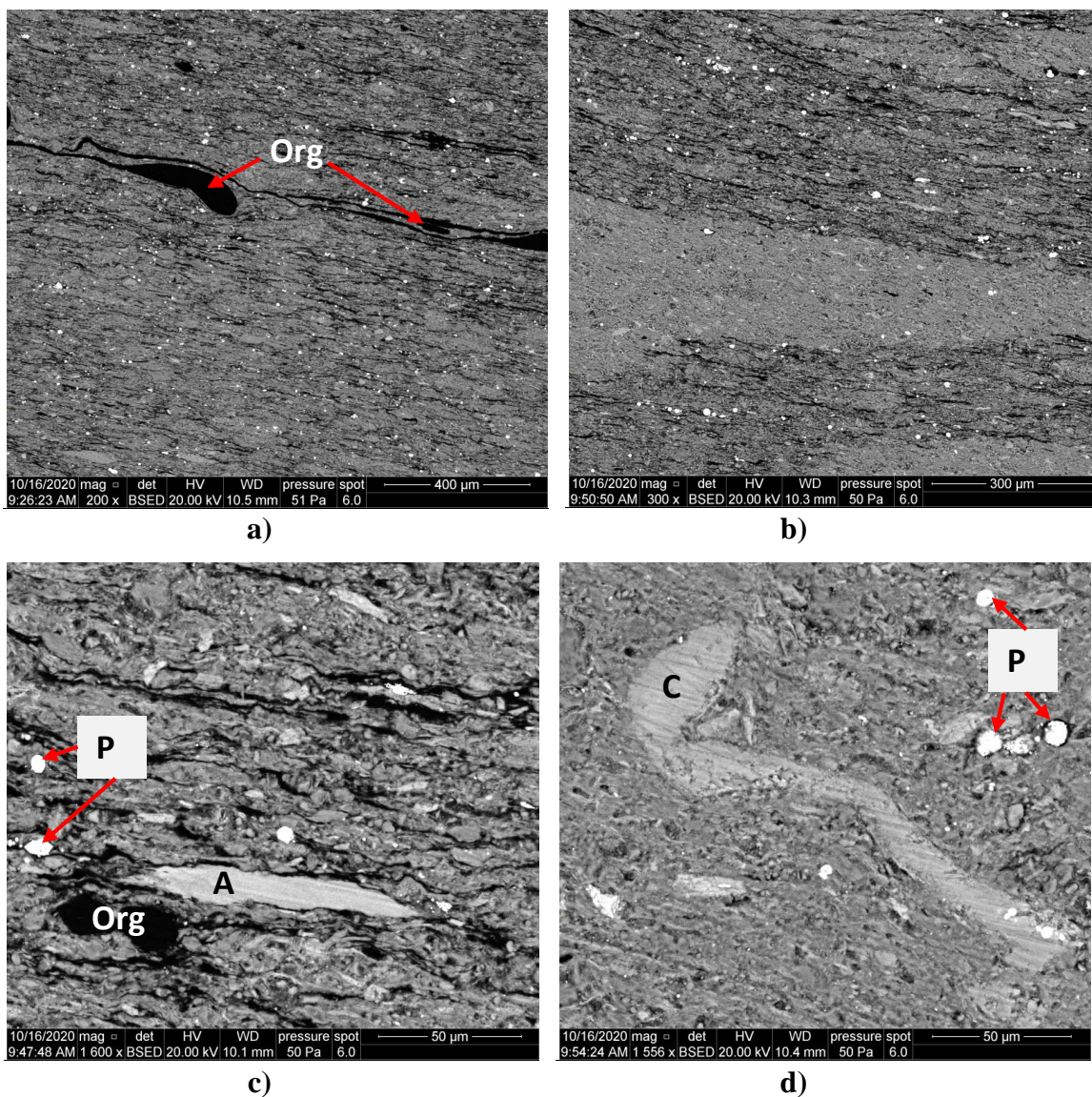




**Rys. 4.2** Obraz powierzchni piaskowca przed eksperymentami. a, b – pow. 200x, c – pow. 800x, d – pow. 1600x. Objaśnienia: C – kalcyt, Fe – tlenki żelaza, G – gips, H – halit, I – min. ilaste, Q – kwarc, S – skalenie

Łupek (Rys. 4.1b) o strukturze aleurytowej, jest skałą ciemnoszarą, wraźnie laminowaną. Barwa wynika z obecności materii organiczej, a także rozproszonych siarczków żelaza. Analiza XRD ujawniła obecność kwarcu – 23,2%, skaleni (plagioklazów i skaleni potasowych, łącznie 6,2%), węglanów (w tym kalcyt, dolomit i ankeryt, łącznie 13,0%), mik i minerałów ilastych (54,0%), a także siarczków żelaza (piryt i markasyt, łącznie 3,6%). Wśród minerałów ilastych dominuje illit (18,0%); z mniejszym udziałem minerałów mieszanopakietowych, typu illit-smektyt (3,3%), chlorytów (4,0%) i kaolinitu 3,6%.





**Rys. 4.3** Obraz powierzchni łupka przed eksperymentami. a – pow. 300x, b – pow. 200x, c – pow. 1600x, d – pow. 1556x. Objaśnienia: A – apatyt, C – kalcyt, Org. – substancja organiczna, P – piryt

W obrazie mikroskopowym SEM (Rys. 4.3a) widoczna jest laminacja w skale, wynikająca z warunków sedymentacji oraz obecności minerałów ilastych i mik o pokroju blaszkowym. Widać, iż struktura skały nie jest jednorodna i miejscowo występują soczewki o zwiększonym udziale minerałów ilastych (na zdjęciu jaśniejsze). Najjaśniejsze punkty widoczne na zdjęciu to kryształki pirytu. Zgodnie z laminacją w skale układają się soczewki i warstewki, w których występuje materia organiczna, w postaci węglowodorów (Rys. 4.3b). Podstawową masę skały stanowią minerały ilaste, łyszczyki (miki) i kwarc, oraz w mniejszym stopniu węglany (kalcyt). Szczegółowa analiza składu mineralnego pozwoliła na identyfikację rzadziej występujących: apatytu (A), pirytu (P) i substancji organicznej (Org), gromadzącej się w przestrzeniach międzywarstwowych (Rys. 4.3c).



Kalcyt (C) występuje w formie rozproszonej w skale lub w formie żyłek – jak na rysunku 4.3d. Gniazdowo występują framboidalne kryształy pirytu (P). Smugi widoczne na powierzchni skały wynikają z procesu przecinania próbki.

## 4.2. Wybrane właściwości petrofizyczne wytypowanych skał

Piaskowiec typu zamkniętego (Rys. 4.1a) charakteryzował się bardzo małą przepuszczalnością dla gazu rzędu  $0,17 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ , a jego porowatość efektywna była rzędu 10%. Natomiast przepuszczalność łupka (Rys. 4.1b) wynosiła poniżej  $0,01 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ , a porowatość efektywna była mniejsza od 0,2%.

Nasycona 2% roztworem KCl skała piaskowcowa w 120 °C, przy ciśnieniu efektywnym 58,7 MPa, równym ciśnieniu ściskającemu szczelinę z uwzględnieniem ciśnienia porowego 3,45 MPa, charakteryzowała się prędkością propagacji fali podłużnej  $V_P = 3198 \text{ m/s}$  oraz fali poprzecznej  $V_S = 1750 \text{ m/s}$ . W przypadku skały łupkowej o bardzo zbitej strukturze zawierającej znaczną ilość minerałów ilastych odstępiono od nasycenia jej solanką. Tym samym, sucha skała łupkowa w 96 °C, przy ciśnieniu efektywnym 62,1 MPa, równym ciśnieniu ściskającemu szczelinę bez ciśnienia porowego, charakteryzowała się  $V_P = 3304 \text{ m/s}$  oraz  $V_S = 1718 \text{ m/s}$ . Prędkości propagacji fal uzyskane dla badanych skał, nieznacznie różniły się od siebie. Parametry sprężystości wybranych skał zostały przedstawione w tabeli 4.2. Dla badanego piaskowca stosunek  $V_P/V_S$  był równy 1,83. Natomiast dla łupka wynosił 1,92. Wielkości charakteryzujące kruchość skał zestawiono w tabeli 4.3. Wyznaczone wartości dynamicznego modułu Young'a i współczynnika Poisson'a piaskowca i łupka są zbliżone do odpowiednich wartości otrzymanych z pomiarów geofizyki otworowej i prezentowanych w literaturze, dla tych rodzajów skał (Bała, 1991).

**Tabela 4.2** Dynamiczne parametry sprężyste dla wybranych skał

Rodzaj skały	Gęstość objętościowa <i>kg/m<sup>3</sup></i>	Parametry sprężyste			
		Moduł Young'a	Współ. Poisson'a	Moduł sprężystości postaciowej	Moduł sprężystości objętościowej
		<i>E<sub>a</sub></i> <i>GPa</i>	<i>v<sub>a</sub></i> -	<i>μ<sub>a</sub></i> <i>GPa</i>	<i>K<sub>a</sub></i> <i>GPa</i>
Piaskowiec (skała nasycona 2% KCl)	2,61	20,6	0,29	8,0	16,1
Łupek (sucha skała)	2,34	18,1	0,31	6,9	16,3

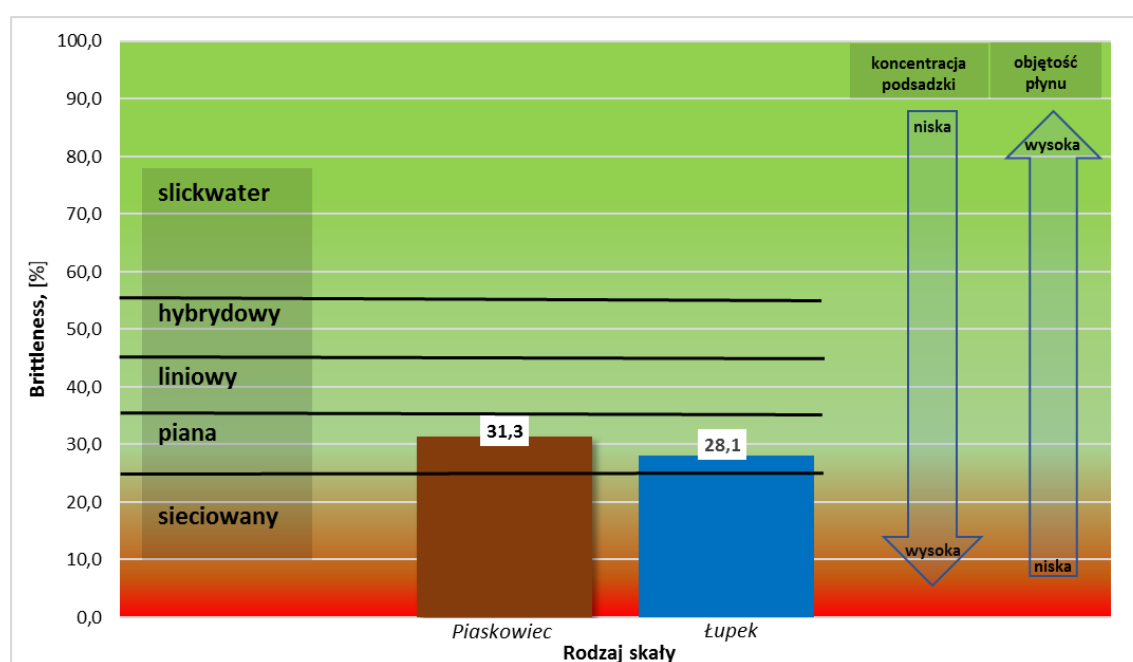
*Dokładność pomiaru oraz wyznaczenia parametrów została przedstawiona w rozdziale 3.4.*

**Tabela 4.3** Kruchość wybranych skał. (YM\_BRIT – kruchość z modułu Young’a, PR\_BRIT – kruchość ze współczynnika Poisson’a, BRIT – kruchość średnia)

Rodzaj skały	YM_BRIT, %	PR_BRIT %	Wskaźnik kruchości BRIT %
Piaskowiec (skała nasycona 2% KCl)	20,6	42,0	<b>31,3</b>
Łupek (sucha skała)	18,1	38,0	<b>28,1</b>

### 4.3. Wstępne wytypowanie technologii hydraulicznego szczelinowania dla badanych złóż niekonwencjonalnych

Na podstawie uzyskanych właściwości sprężystych skał oraz danych literaturowych, przygotowano wykres (Rys. 4.4) na którym przedstawiono dobór cieczy do hydraulicznego szczelinowania dla badanych formacji złożowych.



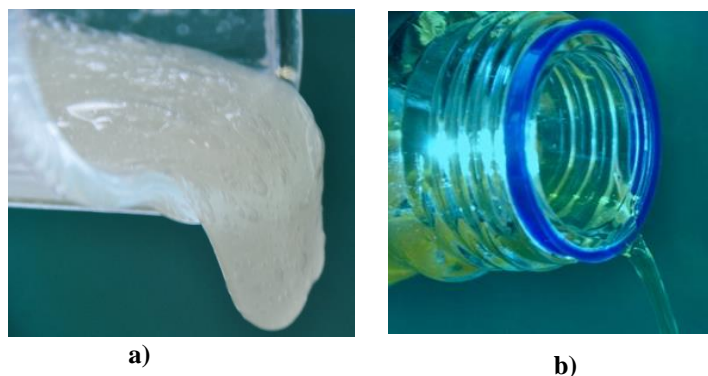
**Rys. 4.4** Dobór cieczy zabiegowej w zależności od kruchości skały. Wskaźnik BRIT z pomiarów ultradźwiękowych dla badanych skał

Wybrana skały piaskowcowa i łupkowa charakteryzowały się obniżoną podatnością na hydrauliczne szczelinowanie. Dlatego do przeprowadzenia badań wybrano technologię hydraulicznego szczelinowania złoża przy użyciu sieciowanych polimerów oraz podsadzki ceramicznej ISP 20/40 o średnicy ziaren, rzędu 0,850 ÷ 0,425 mm. Tego typu technologia detykowana jest dla bardzo wysokich temperatur oraz skał charakteryzujących się podwyższoną zawartością minerałów ilasto-mułowcowych i podwyższoną plastycnością.

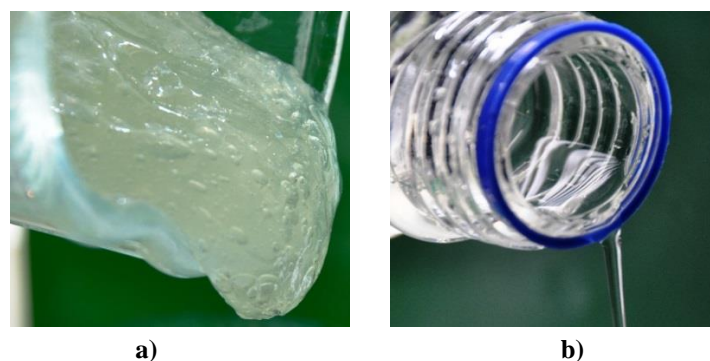
#### 4.4. Płyny szczelinujące użyte do badań

Do badań skały piaskowcowej wytypowano płyn szczelinujący 1 na bazie sieciowanego polimeru liniowego o koncentracji  $4,8 \text{ kg/m}^3$ . Sporządzono go na bazie wody wodociągowej z dodatkiem środka bakteriobójczego, żelującego, oraz stabilizatora minerałów ilastych, nanoemulsji, bufor pH, stabilizatora temperaturowego, czynnika sieciującego oraz upłynniacza. Natomiast do nasycania skały łupkowej użyto płynu szczelinującego 2 o nieco mniejszym stężeniu środka żelującego ( $3,6 \text{ kg/m}^3$ ) i większej koncentracji upłynniacza. Pozostałe składniki płynu były identyczne jak dla skały piaskowcowej.

Po zmieszaniu wszystkich składników i obserwacji płynów w temperaturze otoczenia oraz złożowej, przez okres 24 godzin nie zauważono żadnych zmian. Płyny charakteryzowały się pełną kompatybilnością i stabilnością oraz były jednorodne. Nie zaobserwano w nich osadów stałych. Na rysunkach 4.5 i 4.6 pokazano wizualny wygląd płynów szczelinujących 1 i 2 po usieciowaniu ich w temperaturze pokojowej. Dodatkowo pokazano je po 24 godzinnym wygrzewaniu w temperaturach złożowych. Widać tutaj całkowite upłynnienie się sieciowanego płynu.



**Rys. 4.5** Płyn szczelinujący 1 z dodatkiem łamacza : a) po sieciowaniu w  $22 \text{ }^\circ\text{C}$ , b) po 24 godz. wygrzewania w  $127 \text{ }^\circ\text{C}$  i schłodzeniu do  $22 \text{ }^\circ\text{C}$



**Rys. 4.6** Płyn szczelinujący 2 z dodatkiem łamacza : a) po sieciowaniu w  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ , b) po 24 godz. wygrzewania w  $96 \text{ }^\circ\text{C}$  i schłodzeniu do  $23 \text{ }^\circ\text{C}$

Wykonano także badania właściwości reologicznych płynów szczelinujących bez łamacza oraz przy zadanej koncentracji łamacza w 96 °C i 127 °C. Oba płyny szczelinujące charakteryzują się stabilną lepkością w zadanej temperaturze złożowej, przy szybkości ścinania 170 s<sup>-1</sup>. Lepkość płynu szczelinującego 1 w 127 °C przez okres 90 minut jest rzędu 200 mPa·s, natomiast po dwóch godzinach spada do wartości kilku mPa·s. Z kolei płyn szczelinujący 2 w 96 °C przez okres 90 minut posiada lepkość rzędu 350 mPa·s, natomiast po trzech godzinach spada do wartości kilku mPa·s. Tym samym, oba płyny umożliwiają przetransportowanie podsadzki z powierzchni odwiertu poprzez armaturę odwiertową do wytworzonej szczeliny. Umożliwia to łatwiejszy odbiór płynu ze szczeliny po wykonanym zabiegu.

#### 4.5. Materiał podsadzkowy użyty do badań

Materiał podsadzkowy użyty do podsadzenia szczeliny zobrazowano na zdjęciach (Rys. 4.7) oraz zestawiono rozmiary uziarnienia wraz z wytrzymałością ich na naprężenia ściskające (Tab. 4.4 i 4.5).



**Rys. 4.7** Podsadzka ceramiczna ISP 20/40, użyta do badań

**Tabela 4.4** Wybrane podstawowe właściwości podsadzki ceramicznej ISP 20/40, dla granulacji znormalizowanej (0,850 ÷ 0,425 mm) – Analiza sitowa

<b>Udział % ziaren</b>		
<b>Przedział rozmiarów oczek w sitach w mm</b>	<b>Średni rozmiar <i>d</i> mm</b>	<b>Ilość ziaren w przedziale % masowy</b>
1,400 do 1,180	1,290	0,0
1,180 do 0,850	1,015	2,3
0,850 do 0,710	0,780	29,1
0,710 do 0,600	0,655	45,3
0,600 do 0,500	0,550	21,0
0,500 do 0,425	0,463	2,0
0,425 do 0,300	0,363	0,3
0,300 do 0	0,150	0,0

**Tabela 4.5** Wybrane podstawowe właściwości podsadzki ceramicznej ISP 20/40, dla granulacji znormalizowanej (0,850 ÷ 0,425 mm) – Wytrzymałość podsadzki

<b><u>TEST WYTRZYMAŁOŚCIOWY</u></b>	
<b>Wartość naprężenia ściskającego</b> <i>MPa</i>	<b>Procent masowy zniszczonych ziaren podsadzki</b> <i>%</i>
69,0	2,4 +/- 0,1
82,8	4,3 +/- 0,1
96,5	6,4 +/- 0,1
103,4	7,7 +/- 0,1

Użyta do badań podsadzka ceramiczna ISP 20/40 (o średniej wytrzymałości na ściskanie), spełniała wszystkie kryteria podstawowych właściwości stawianych przez normy materiałowi podsadzkowemu. Tym samym może być ona stosowana w zabiegach hydraulicznego szczelinowania. Posiadała ona średnią gęstością nasypową 1,89 g/cm<sup>3</sup> i gęstość pozorną 3,30 g/cm<sup>3</sup>. Największą ilość ziaren podsadzki stanowiły ziarna o średnicy od 0,600 mm do 0,710 mm. Średnia średnica ziaren podsadzki  $d_{av}$  była rzędu 0,673 mm. Charakteryzowały się one wysoką sferycznością (kulistość – 0,88, krągłość – 0,85) oraz wysoką odpornością na naprężenia ściskające.

#### **4.6. Testy zjawiska embedmentu**

W rozdziale tym przedstawiono wyniki badań wybranych dwóch skał złożowych. Zawierają one następujące informacje:

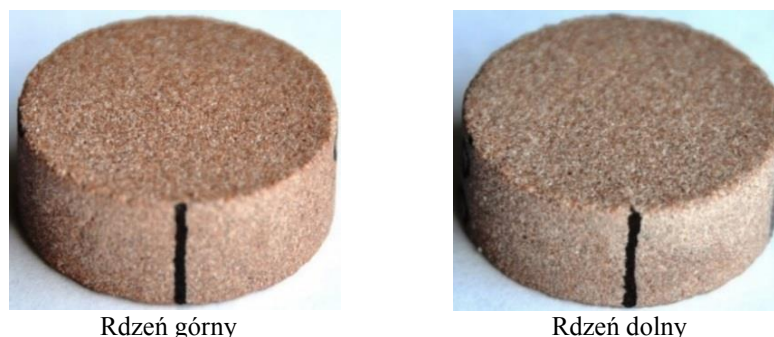
- warunki wykonania testów dla skał suchych oraz nasyconych w płynie szczelinującym,
- wygląd powierzchni użytych rdzeni przed i po laboratoryjnej symulacji zjawiska embedmentu,
- zestawienie wytypowanych obszarów do analizy powierzchni rdzeni przed i po teście,
- dane użyte do analizy chropowatości pierwotnej powierzchni skały oraz zjawiska wgniatania ziaren podsadzki w powierzchnie ścian szczeliny z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego
- wyniki badań i analizy chropowatości pierwotnej powierzchni skały,
- wyniki badań i analizy zjawiska wgniatania ziaren podsadzki w skałę z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego pochodzącego z wgnieceń,
- analizę morfologii powierzchni skały,
- statystyczną analizę uzyskanych wyników.

## Testy dla piaskowca

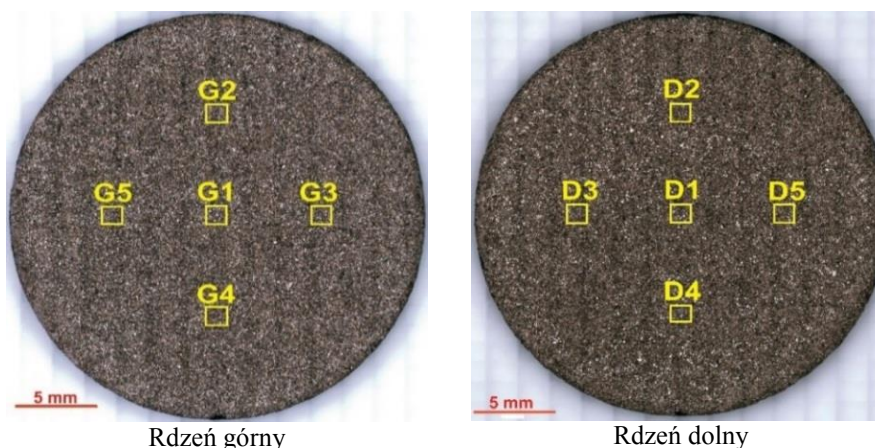
### Test 1

Podczas pierwszego testu sztucznie wytworzona szczelina w suchej skale piaskowcowej wypełniona była podsadzką pomiędzy rdzeniem górnym o średnicy 25,40 mm i długości 10,34 mm oraz z rdzeniem dolnym o średnicy 25,41 mm i długości 10,08 mm. Koncentracja powierzchniowa podsadzki była równa 4,88 kg/m<sup>2</sup> (tj. 1,0 lb/ft<sup>2</sup>). Laboratoryjny test wykonano w temperaturze 127,5 °C, stosując ciśnienie ( $P_{ef} = 86,5$  MPa) ściskające szczelinę i podsadzkę przez okres sześciu godzin. Wzrost ciśnienia do wartości zadanej był ze stałą prędkością równą 3,45 MPa/min.

Na rysunkach 4.8 i 4.10 pokazano powierzchnie użytych rdzeni oraz wytypowane do analizy powierzchni przed i po laboratoryjnej symulacji zjawiska embedmentu (Rys. 4.9 i 4.11). Z kolei w tabelach 4.6 i 4.8 przedstawiono dane użyte do analizy chropowatości pierwotnej powierzchni skały oraz zjawiska embedmentu z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego. Materiały graficzne obejmujące wytypowane odcinków pomiarowe, dla których przeprowadzono analizy profili chropowatości oraz wgnieceń ziaren podsadzki i wycisków materiału skalnego umieszczono w formie załącznika na rysunkach od Z-1 do Z-4. Natomiast wyniki testu 1 zestawiono w tabelach 4.7, 4.9, 4.10 i 4.26.



**Rys. 4.8** Suche rdzenie, przed testem 1



**Rys. 4.9** Powierzchnie czołowe suchych rdzeni wraz z wytypowanymi do analiz obszarami, pod mikroskopem (obiektyw 5x), przed testem 1

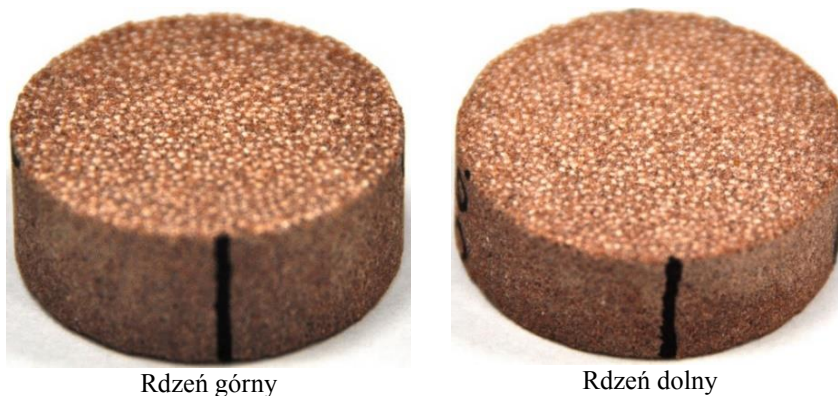


**Tabela 4.6** Zestawienie danych użytych do analizy chropowatości powierzchni ścian szczeliny dla piaskowca, przed testem 1

Parametry	Rdzeń górny	Rdzeń dolny
Pole powierzchni czołowej, $mm^2$	506,530 $\pm$ 0,005	506,690 $\pm$ 0,005
Liczba badanych obszarów	5	5
Całkowite pole powierzchni obszarów, $mm^2$	5,298 $\pm$ 0,004	5,297 $\pm$ 0,004
Zanalizowana powierzchnia rdzenia, %	1,05	1,04
Liczba pojedynczych odcinków pomiarowych profilu wgniecień i wycisków	15	15
Całkowita długość profilu, $mm$	15,888 $\pm$ 0,006	16,041 $\pm$ 0,006
Liczba wgniecień	134	127
Liczba wycisków	114	117

**Tabela 4.7** Wyniki chropowatości powierzchni ścian szczeliny dla piaskowca, przed testem 1

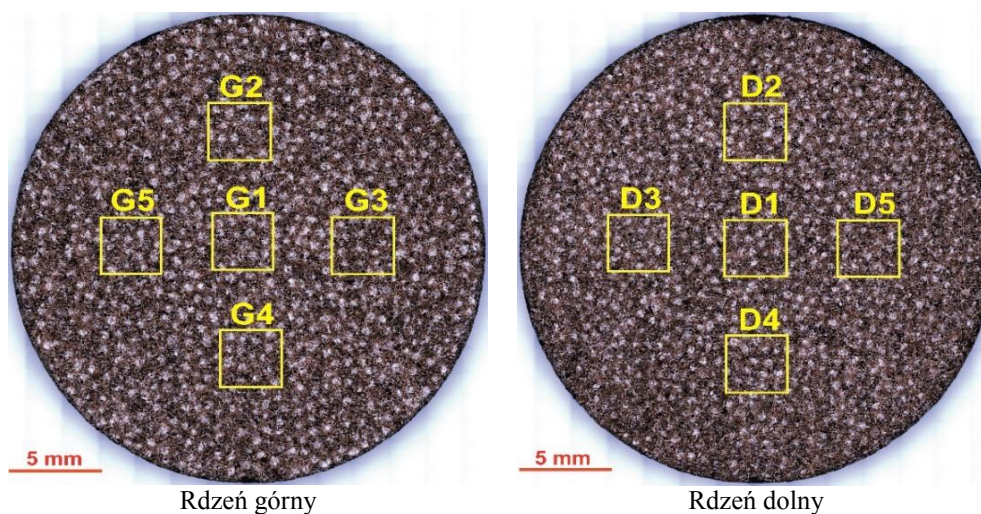
Parametry	Rdzeń górny	Rdzeń dolny
Chropowatość $R_a$ , $mm$	0,0137 $\pm$ 0,0080	0,0127 $\pm$ 0,0073
Średnia chropowatość $R_{a,sr}$ , $mm$	<b>0,0132 <math>\pm</math> 0,0077</b>	



Rdzeń górny

Rdzeń dolny

**Rys. 4.10** Rdzenie, po teście 1



Rdzeń górny

Rdzeń dolny

**Rys. 4.11** Powierzchnie czołowe suchych rdzeni wraz z wytypowanymi do analiz obszarami, pod mikroskopem (obiektyw 5x, polaryzator), po teście 1

**Tabela 4.8** Zestawienie danych użytych do analizy zjawiska wgniatania ziaren podsadzki w powierzchnie ścian szczeliny z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego dla piaskowca, po teście 1

Parametry	Rdzeń górny	Rdzeń dolny
Pole powierzchni czołowej rdzenia, $mm^2$	507,368 +/- 0,005	506,849 +/- 0,005
Liczba badanych obszarów	5	5
Całkowite pole powierzchni obszarów, $mm^2$	44,938 +/- 0,008	44,975 +/- 0,008
Zanalizowana powierzchnia rdzenia, %	8,86	8,87
Liczba pojedynczych odcinków pomiarowych dla profilu chropowatości	20	20
Całkowita długość profilu, $mm$	58,822 +/- 0,015	59,559 +/- 0,015
Liczba wgłębień	60	59
Liczba wzniesień	119	114

**Tabela 4.9** Wyniki badań i analiz wgniatania ziaren podsadzki w powierzchnię ścian szczeliny dla piaskowca, po teście 1

Parametry	Rdzeń górny	Rdzeń dolny
Wgniecenie podsadzki w powierzchnię skały		
Średnia głębokość $H_e$ , $mm$	0,029 +/- 0,013	0,028 +/- 0,012
Średnia szerokość $W_e$ , $mm$	0,326 +/- 0,084	0,317 +/- 0,087
Procentowe uszkodzenie powierzchni $PUS_e$ , %	33,29 +/- 1,54	31,42 +/- 1,49
Wycisk materiału skalnego na powierzchni skały		
Średnia wysokość $H_w$ , $mm$	0,023 +/- 0,014	0,021 +/- 0,013
Średnia szerokość $W_w$ , $mm$	0,361 +/- 0,081	0,360 +/- 0,085
Procentowe uszkodzenie powierzchni $PUS_w$ , %	36,50 +/- 3,04	34,47 +/- 2,88
<b>Zjawisko embedmentu z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego</b>		
Średnia głębokość i wysokość $H_{ew}$ , $mm$	<b>0,052 +/- 0,027</b>	<b>0,049 +/- 0,028</b>
Średnia szerokość $W_{ew}$ , $mm$	<b>0,687 +/- 0,165</b>	<b>0,677 +/- 0,172</b>
Procentowe uszkodzenie powierzchni $PUS_{ew}$ , %	<b>69,79 +/- 4,58</b>	<b>65,89 +/- 4,37</b>

**Tabela 4.10** Średnie wartości głębokości wgniecenia ziarna podsadzki i wysokości wycisku materiału skalnego oraz ich szerokości dla suchej skały piaskowcowej, po teście 1

Średnia głębokość i wysokość $H_{ew\_sr}$ , $mm$	<b>0,051 +/- 0,026</b>
Średnia głębokość $H_{e\_sr}$ , $mm$	0,029 +/- 0,012
Średnia szerokość $W_{ew\_sr}$ , $mm$	0,682 +/- 0,168
Średnia szerokość $W_{e\_sr}$ , $mm$	0,322 +/- 0,085

Rdzenie użyte do testu 1 charakteryzowały się zbliżonymi wartościami chropowatości pierwotnej powierzchni czołowej, tj. 0,0137 mm dla rdzenia górnego i 0,0127 mm dla rdzenia dolnego. Tym samym, można przyjąć, że ich powierzchnie były jednakowo przygotowane.



Po teście 1 i cyfrowym zobrazowaniu powierzchni czołowych rdzeni, wykonano dla nich analizę zbliżonej liczby wgnieceń i wycisków.

Średnia głębokość wgniatania ziaren podsadzki w rdzeń górny ( $H_e = 0,029$  mm) była o 3,57% wyższa w stosunku do rdzenia dolnego. Natomiast łączna średnia głębokość wgniecenia i wysokości wycisku dla rdzenia górnego ( $H_{ew} = 0,052$  mm) była wyższa o 6,12% od drugiego rdzenia. Natomiast średnia szerokość wgniecenia ziarna podsadzki w górny rdzeń ( $W_e = 0,326$  mm) była o 2,84% wyższa w stosunku do rdzenia dolnego. Z kolei łączna średnia szerokość wgniecenia ziaren i wycisku ( $W_{ew} = 0,687$  mm) była dla rdzenia górnego wyższa o 1,48% od rdzenia drugiego.

Procentowe uszkodzenie  $PUS_e$  powierzchni skały spowodowane przez wgniecenia ziaren podsadzki dla rdzenia górnego, było równe 33,29%, a dla dolnego równe 31,42% większe w stosunku do drugiego rdzenia. Natomiast uszkodzenie  $PUS_{ew}$  spowodowane przez wgniecenia ziaren i wyciski materiału skalnego było większe w przypadku rdzenia górnego 69,79%, niż rdzenia dolnego 65,89%. Można więc przyjąć, że wielkości uzyskane zarówno dla górnego i dolnego rdzenia były porównywalne.

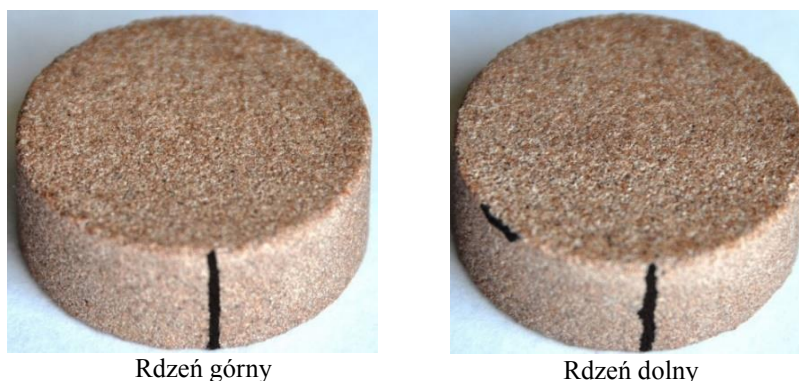
Wyznaczona dla ściany szczeliny średnia głębokość wgniecenia ziarna podsadzki i wysokość wycisku materiału skalnego ( $H_{ew_{sr}} = 0,051$  mm) stanowiła 7,58% średniej średnicy ziaren podsadzki ( $d_{av} = 0,673$  mm). Natomiast średnia szerokość wgniecenia ziarna podsadzki w powierzchnię skały ( $W_{e_{sr}} = 0,322$  mm) stanowiła 47,85%  $d_{av}$ . Z kolei średnia szerokość wgniecenia i wycisku ( $W_{ew_{sr}} = 0,682$  mm) stanowiła 101,34%  $d_{av}$ .

## Test 2

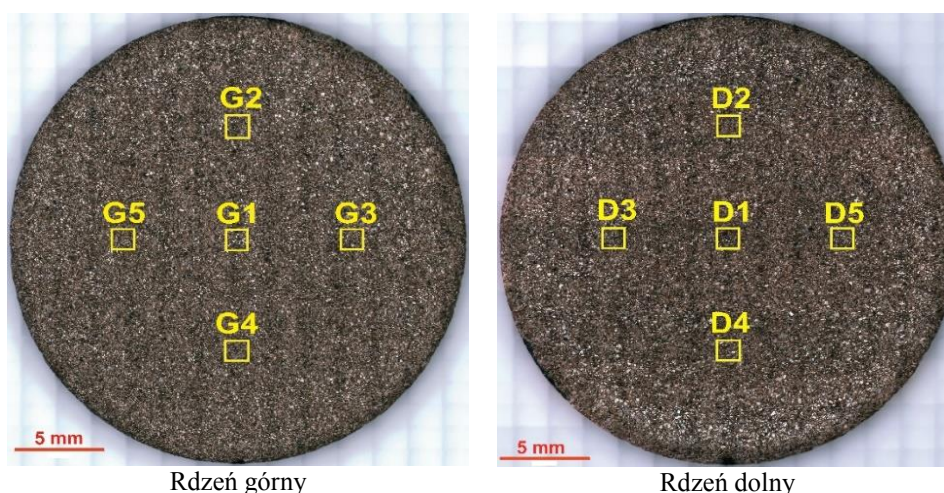
Podczas drugiego testu, szczelina wypełniona była podsadzką pomiędzy rdzeniami wstępnie nasyconymi płynem szczelinującym 1. Górny rdzeń charakteryzował się średnicą 25,40 mm i długością 10,01 mm, a dolny rdzeń miał taką samą średnicę oraz długość 9,41 mm. Laboratoryjny test wykonano w takich samych warunkach temperatury i ciśnienia ściskającego szczelinę, jak miało podczas testu 1.

Wizualny obraz użytych rdzeni pokazano na rysunkach 4.12, 4.14 i 4.15. Obszary wytypowane do analizy powierzchni przed i po laboratoryjnej symulacji zjawiska embedmentu przedstawiono na rysunkach 4.13 i 4.16. Z kolei w tabelach 4.11 i 4.13 przedstawiono dane użyte do analizy chropowatości pierwotnej powierzchni skały oraz zjawiska embedmentu z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego. Materiały graficzne obejmujące wytypowane odcinki pomiarowe, dla których przeprowadzono analizy profili chropowatości oraz wgnieceń ziaren podsadzek i wycisków materiału skalnego

umieszczono w formie załącznika (rysunki od Z-5 do Z-8). Natomiast wyniki testu 2 zestawiono w tabelach 4.12, 4.14, 4.15 i 4.26.



**Rys. 4.12** Suche rdzenie, przed testem 2



**Rys. 4.13** Powierzchnie czołowe suchych rdzeni wraz z wytypowanymi do analiz obszarami, pod mikroskopem (obiektyw 5x), przed testem 2

**Tabela 4.11** Zestawienie danych użytych do analizy chropowatości powierzchni ścian szczeliny dla piaskowca, przed testem 2

Parametry	Rdzeń górny	Rdzeń dolny
Pole powierzchni czołowej rdzenia, $mm^2$	506,530 $\pm$ 0,005	506,490 $\pm$ 0,005
Liczba badanych obszarów	5	5
Całkowite pole powierzchni obszarów, $mm^2$	5,245 $\pm$ 0,004	5,298 $\pm$ 0,004
Zanalizowana powierzchnia rdzenia, %	1,04	1,05
Liczba pojedynczych odcinków pomiarowych dla profilu chropowatości	20	20
Całkowita długość profilu, $mm$	15,888 $\pm$ 0,006	16,035 $\pm$ 0,006
Liczba wgłębień	125	133
Liczba wzniesień	104	112

**Tabela 4.12** Wyniki chropowatości powierzchni ścian szczeliny dla piaskowca, przed testem 2

Parametry	Rdzeń górny	Rdzeń dolny
Chropowatość $R_a$ , mm	0,0159 +/- 0,0090	0,0143 +/- 0,0093
Średnia chropowatość $R_{a_{sr}}$ , mm	0,0151 +/- 0,0092	



Rdzeń górny

Rdzeń dolny

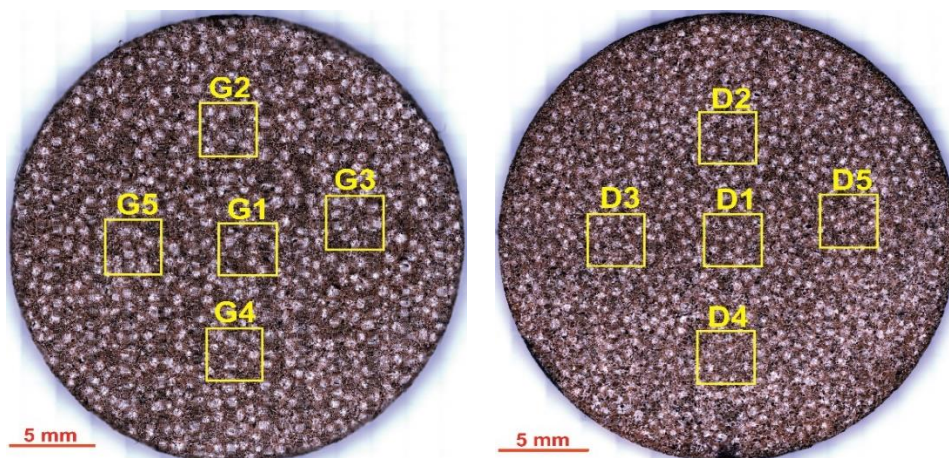
**Rys. 4.14** Powierzchnie czołowe rdzeni nasyconych płynem szczelinującym 1, przed testem 2



Rdzeń górny

Rdzeń dolny

**Rys. 4.15** Rdzenie, po teście 2



Rdzeń górny

Rdzeń dolny

**Rys. 4.16** Powierzchnie czołowe rdzeni wraz z wytypowanymi do analiz obszarami, pod mikroskopem (obiektyw 5x, polaryzator), po teście 2

**Tabela 4.13** Zestawienie danych użytych do analizy zjawiska wgniatania ziaren podsadzki w powierzchnie ścian szczeliny z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego dla piaskowca, po teście 2

Parametry	Rdzeń górny	Rdzeń dolny
Pole powierzchni czołowej, $mm^2$	507,177 +/- 0,005	507,089 +/- 0,005
Liczba badanych obszarów	5	5
Całkowite pole powierzchni obszarów, $mm^2$	41,915 +/- 0,008	40,992 +/- 0,008
Zanalizowana powierzchnia rdzenia, %	8,26	8,08
Liczba pojedynczych odcinków pomiarowych profilu wgniecia i wycisków	20	20
Całkowita długość profilu, $mm$	52,190 +/- 0,015	52,376 +/- 0,015
Liczba wgniecia	46	50
Liczba wycisków	87	98

**Tabela 4.14** Wyniki badań i analiz wgniatania ziaren podsadzki w powierzchnię ścian szczeliny dla piaskowca, po teście 2

Parametry	Rdzeń górny	Rdzeń dolny
Wgniecenie podsadzki w powierzchnię skały		
Średnia głębokość $H_e$ , $mm$	0,052 +/- 0,019	0,038 +/- 0,018
Średnia szerokość $W_e$ , $mm$	0,381 +/- 0,076	0,313 +/- 0,076
Procentowe uszkodzenie powierzchni $PUS_e$ , %	33,58 +/- 1,33	29,84 +/- 1,44
Wycisk materiału skalnego na powierzchni skały		
Średnia wysokość $H_w$ , $mm$	0,044 +/- 0,020	0,033 +/- 0,019
Średnia szerokość $W_w$ , $mm$	0,459 +/- 0,116	0,449 +/- 0,099
Procentowe uszkodzenie powierzchni $PUS_w$ , %	38,23 +/- 2,51	41,96 +/- 2,82
<b><u>Zjawisko embedmentu z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego</u></b>		
Średnia głębokość i wysokość $H_{ew}$ , $mm$	<b>0,096 +/- 0,039</b>	<b>0,071 +/- 0,037</b>
Średnia szerokość $W_{ew}$ , $mm$	0,840 +/- 0,192	0,762 +/- 0,175
Procentowe uszkodzenie powierzchni $PUS_{ew}$ , %	<b>71,81 +/- 3,84</b>	<b>71,80 +/- 4,26</b>

**Tabela 4.15** Średnie wartości głębokości wgniecenia ziarna podsadzki i wysokości wycisku materiału skalnego oraz ich szerokości dla skały piaskowcowej nasyconej płynem szczelinującym 1, po teście 2

Średnia głębokość i wysokość $H_{ew_{sr}}$ , $mm$	<b>0,083 +/- 0,040</b>
Średnia głębokość $H_{e_{sr}}$ , $mm$	0,045 +/- 0,020
Średnia szerokość $W_{ew_{sr}}$ , $mm$	0,799 +/- 0,190
Średnia szerokość $W_{e_{sr}}$ , $mm$	0,345 +/- 0,083

Rdzenie wykorzystane w teście 2, podobnie jak miało to miejsc w poprzednim teście 1, charakteryzowały się zbliżonymi wartościami pierwotnej chropowatości, tj. 0,0159 mm dla rdzenia górnego i 0,0143 mm dla rdzenia dolnego. Można więc przyjąć, że ich powierzchnie czołowe były jednakowo przygotowane.

Po laboratoryjnej symulacji zjawiska embedmentu, dla rdzenia dolnego zanalizowana liczba wgnieceń i wycisków, była o ok. 10 % większa niż dla drugiego rdzenia.

Zaobserwowano różnicę średniej głębokości wgnieceń  $H_e$  pomiędzy rdzeniami. Dla rdzenia górnego uzyskano wartość 0,052 mm. Była ona o 36,84% wyższa niż dla rdzenia dolnego. Łączna średnia głębokość wgniecenia i wysokości wycisku dla rdzenia górnego ( $H_{ew} = 0,096$  mm) była wyższa o 35,21% od drugiego rdzenia. Natomiast średnia szerokość wgniecenia ziarna podsadzki w rdzeń górny ( $W_e = 0,381$  mm) była o 21,73% wyższa w stosunku do rdzenia dolnego. Natomiast łączna średnia szerokość wgniecenia i wycisku ( $W_{ew} = 0,840$  mm) była dla rdzenia górnego wyższa o 10,24% od drugiego rdzenia.

Procentowe uszkodzenie  $PUS_e$  powierzchni skały spowodowane przez wgniecenia ziaren podsadzki dla rdzenia górnego, było równe 33,58%, a dla drugiego rdzenia 29,84%. Uszkodzenie powierzchni skały ( $PUS_{ew} = 71,81\%$ ) spowodowane przez wgniecenia ziaren i wyciski materiału skalnego, było porównywalne dla obydwu rdzeni.

Różnice w wielkościach uzyskanych dla obu rdzeni mogły być dodatkowo spowodowane nierównomiernym rozmieszczeniem ziaren podsadzki w płynie pozabiegowym, który został umieszczony na ich powierzchniach czołowych.

Wyznaczona dla ściany szczeliny średnia głębokość wgniecenia ziarna podsadzki i wysokość wycisku materiału skalnego ( $H_{ew_{sr}} = 0,083$  mm) stanowiła 12,33% średniej średnicy ziaren podsadzki  $d_{av}$ . Natomiast średnia szerokość wgniecenia ziarna podsadzki w powierzchnię skały ( $W_{e_{sr}} = 0,345$  mm) stanowiła 51,26%  $d_{av}$ . Z kolei średnia szerokość wgniecenia i wycisku ( $W_{ew_{sr}} = 0,799$  mm) stanowiła 118,72%  $d_{av}$ .

## Testy dla łupka

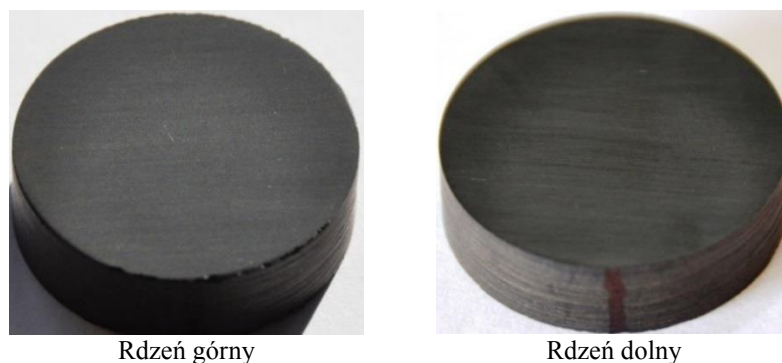
### Test 3

Podczas trzeciego testu, sztucznie wytworzona szczelina w suchej skale łupkowej wypełniona była podsadzką pomiędzy górnym rdzeniem o średnicy 25,40 mm i długości 7,52 mm oraz dolnym rdzeniem o średnicy 25,38 mm i długości 6,86 mm. Koncentracja powierzchniowa podsadzki była równa 4,88 kg/m<sup>2</sup> (tj. 1,0 lb/ft<sup>2</sup>). Laboratoryjne badanie wykonano w temperaturze 96,5 °C przy ciśnieniu 65,5 MPa przez okres sześciu godzin.



Wzrost ciśnienia ściskającego szczelinę i podszkłę do wartości zadanej był ze stałą prędkością równą 3,45 MPa/min.

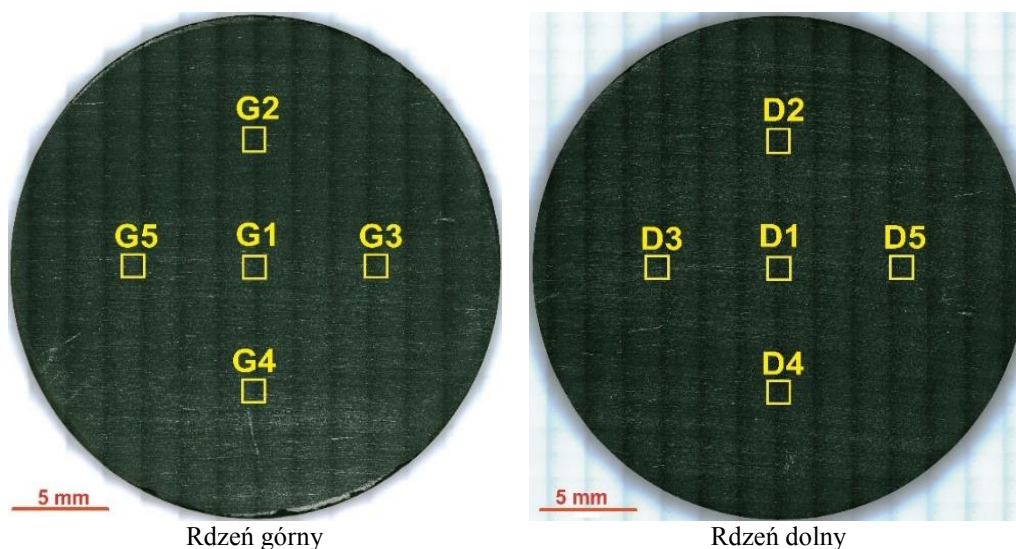
Na rysunkach 4.17 i 4.19 pokazano powierzchnie użytych rdzeni oraz wytypowane do analizy powierzchni przed i po laboratoryjnej symulacji zjawiska embedmentu (Rys. 4.18 i 4.20). Z kolei w tabelach 4.16 i 4.18 przedstawiono dane użyte do analizy chropowatości pierwotnej powierzchni skały oraz zjawiska embedmentu z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego. Materiały graficzne obejmujące wytypowane odcinki pomiarowe, dla których przeprowadzono analizy profili chropowatości oraz wgnieceń ziaren podsadzek i wycisków materiału skalnego umieszczono w formie załącznika na rysunkach od Z-9 do Z-12. Natomiast wyniki testu 3 zestawiono w tabelach 4.17, 4.19, 4.20 i 4.27.



Rdzeń górny

Rdzeń dolny

**Rys. 4.17** Suche rdzenie, przed testem 3



Rdzeń górny

Rdzeń dolny

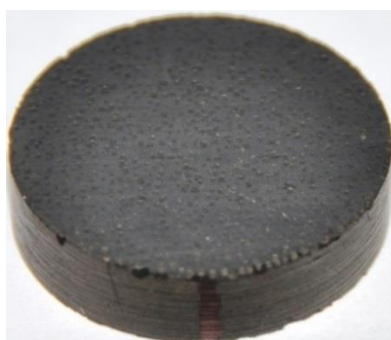
**Rys. 4.18** Powierzchnie czołowe suchych rdzeni wraz z wytypowanymi do analiz obszarami, pod mikroskopem (obiektyw 5x), przed testem 3

**Tabela 4.16** Zestawienie danych użytych do analizy chropowatości powierzchni ścian szczeliny dla łupka, przed testem 3

Parametry	Rdzeń górny	Rdzeń dolny
Pole powierzchni czołowej rdzenia, $mm^2$	505,892 +/- 0,005	505,215 +/- 0,005
Liczba badanych obszarów	5	5
Całkowite pole powierzchni obszarów, $mm^2$	5,354 +/- 0,004	5,441 +/- 0,004
Zanalizowana powierzchnia rdzenia, %	1,06	1,08
Liczba pojedynczych odcinków pomiarowych dla profilu chropowatości	15	15
Całkowita długość profilu, $mm$	15,979 +/- 0,006	16,087 +/- 0,006
Liczba wgłębień	267	266
Liczba wzniesień	294	256

**Tabela 4.17** Wyniki chropowatości powierzchni ścian szczeliny dla łupka, przed testem 3

Parametry	Rdzeń górny	Rdzeń dolny
Chropowatość $R_a$ , $mm$	0,0003 +/- 0,0002	0,0003 +/- 0,0002
Średnia chropowatość $R_{a_{sr}}$ , $mm$	<b>0,0003 +/- 0,0002</b>	

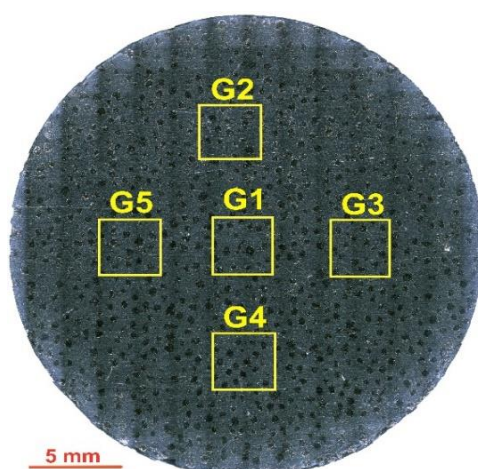


Rdzeń górny

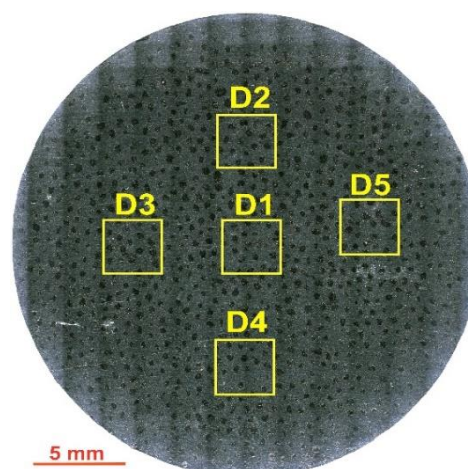


Rdzeń dolny

**Rys. 4.19** Rdzenie, po teście 3



Rdzeń górny



Rdzeń dolny

**Rys. 4.20** Powierzchnie czołowe suchych rdzeni wraz z wytypowanymi do analiz obszarami, pod mikroskopem (obiektyw 5x, polaryzator), po teście 3

**Tabela 4.18** Zestawienie danych użytych do analizy zjawiska wgniatania ziaren podsadzki w powierzchnie ścian szczeliny z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego dla łupka, po teście 3

Parametry	Rdzeń górny	Rdzeń dolny
Pole powierzchni czołowej, $mm^2$	506,411 +/- 0,005	505,813 +/- 0,005
Liczba badanych obszarów	5	5
Całkowite pole powierzchni obszarów, $mm^2$	43,750 +/- 0,008	42,328 +/- 0,008
Zanalizowana powierzchnia rdzenia, %	8,64	8,37
Liczba pojedynczych odcinków pomiarowych profilu wgniecia i wycisków	20	20
Całkowita długość profilu, $mm$	56,156 +/- 0,015	56,743 +/- 0,015
Liczba wgniecia	51	59
Liczba wycisków	100	117

**Tabela 4.19** Wyniki badań i analiz wgniatania ziaren podsadzki w powierzchnię ścian szczeliny dla łupka, po teście 3

Parametry	Rdzeń górny	Rdzeń dolny
Wgniecenie podsadzki w powierzchnię skały		
Średnia głębokość $H_e$ , $mm$	0,037 +/- 0,010	0,022 +/- 0,009
Średnia szerokość $W_e$ , $mm$	0,327 +/- 0,069	0,280 +/- 0,062
Procentowe uszkodzenie powierzchni $PUS_e$ , %	29,74 +/- 1,37	29,06 +/- 1,57
Wycisk materiału skalnego na powierzchni skały		
Średnia wysokość $H_w$ , $mm$	0,027 +/- 0,023	0,017 +/- 0,015
Średnia szerokość $W_w$ , $mm$	0,453 +/- 0,117	0,338 +/- 0,060
Procentowe uszkodzenie powierzchni $PUS_w$ , %	40,34 +/- 2,68	34,83 +/- 3,10
<b><u>Zjawisko embedmentu z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego</u></b>		
Średnia głębokość i wysokość $H_{ew}$ , $mm$	<b>0,064 +/- 0,033</b>	<b>0,039 +/- 0,024</b>
Średnia szerokość $W_{ew}$ , $mm$	0,780 +/- 0,186	0,618 +/- 0,122
Procentowe uszkodzenie powierzchni $PUS_{ew}$ , %	<b>70,08 +/- 4,05</b>	<b>63,89 +/- 4,67</b>

**Tabela 4.20** Średnie wartości głębokości wgniecenia ziarna podsadzki i wysokości wycisku materiału skalnego oraz ich szerokości dla suchej skały łupkowej, po teście 3

Średnia głębokość i wysokość $H_{ew\_sr}$ , $mm$	<b>0,050 +/- 0,031</b>
Średnia głębokość $H_{e\_sr}$ , $mm$	0,029 +/- 0,012
Średnia szerokość $W_{ew\_sr}$ , $mm$	0,693 +/- 0,164
Średnia szerokość $W_{e\_sr}$ , $mm$	0,302 +/- 0,070

Rdzenie, użyte do testu 3 charakteryzowały się taką samą wartością chropowatości pierwotnej powierzchni czołowej, równą 0,0003 mm. Tak więc ich powierzchnie były jednakowo przygotowane.



Po teście 3 i cyfrowym zobrazowaniu powierzchni czołowych rdzeni, dla dolnego rdzenia stwierdzono większą ilość wgnieceń i wycisków, niż miało to miejsce dla rdzenia górnego. Różnica ta była rzędu 17%.

Średnia głębokość wgniatania ziaren podsadzki w rdzeń górny ( $H_e = 0,037$  mm) była o 68,18% wyższa w stosunku do rdzenia dolnego. Natomiast łączna średnia głębokość wgniecenia i wysokości wycisku ( $H_{ew} = 0,064$  mm) była dla rdzenia górnego wyższa o 64,10%. Średnia szerokość wgniecenia ziarna podsadzki w rdzeń górny ( $W_e = 0,327$  mm) była o 16,79% wyższa w stosunku do rdzenia dolnego. Łączna średnia szerokość wgniecenia i szerokości wycisku ( $W_{ew} = 0,780$  mm) była dla rdzenia górnego wyższa o 26,21%.

Procentowe uszkodzenie powierzchni skały ( $PUS_e = 29,74\%$ ) spowodowane przez wgniecenia ziarna podsadzki dla obu rdzeni było zbliżone. Natomiast uszkodzenie spowodowane przez wgniecenia ziaren i wyciski materiału skalnego dla rdzenia górnego ( $PUS_{ew} = 70,08\%$ ) było większe od drugiego rdzenia ( $PUS_{ew} = 63,89\%$ ). Można przyjąć, że wartości uzyskane zarówno dla rdzenia dolnego i górnego były porównywalne.

Różnice w wielkościach uzyskanych dla obu rdzeni mogły być spowodowane poprzez różne rozmiary ziaren wchodzących w skład materiału podsadzkowego oraz nierównomiernym rozmieszczeniem ich na powierzchniach czołowych rdzeni.

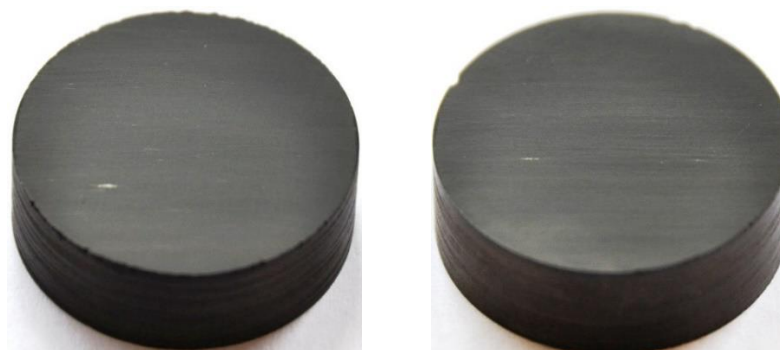
Wyznaczona dla ściany szczeliny średnia głębokość wgniecenia ziarna podsadzki i wysokość wycisku materiału skalnego ( $H_{ew_{sr}} = 0,050$  mm) stanowiła 7,43% średniej średnicy ziaren podsadzki ( $d_{av} = 0,673$  mm). Natomiast średnia szerokość wgniecenia ziaren podsadzki w powierzchnię skały ( $W_{e_{sr}} = 0,302$  mm) stanowiła 44,87%  $d_{av}$ . Z kolei średnia szerokość wgniecenia i wycisku ( $W_{ew_{sr}} = 0,693$  mm) stanowiła 102,97%  $d_{av}$ .

#### Test 4

Podczas czwartego testu, wypełniona podsadzką szczelina składała się z rdzeni wstępnie nasyconych płynem szczelinującym 2. Górny rdzeń charakteryzował się średnicą 25,42 mm i długością 7,80 mm, a dolny rdzeń średnicą 25,40 mm i długością 6,95 mm. Laboratoryjny test 4 wykonano w takich samych warunkach temperatury i ciśnienia ściskającego skałę, jak miało to miejsce w teście 3.

Obraz użytych rdzeni pokazano na rysunkach 4.21, 4.23 i 4.24. Na rysunkach 4.22 i 4.25 przedstawiono obszary wytypowane do analizy powierzchni przed i po laboratoryjnej symulacji zjawiska embedmentu. Z kolei w tabelach 4.21 i 4.23 przedstawiono dane użyte do analizy chropowatości pierwotnej powierzchni skały oraz

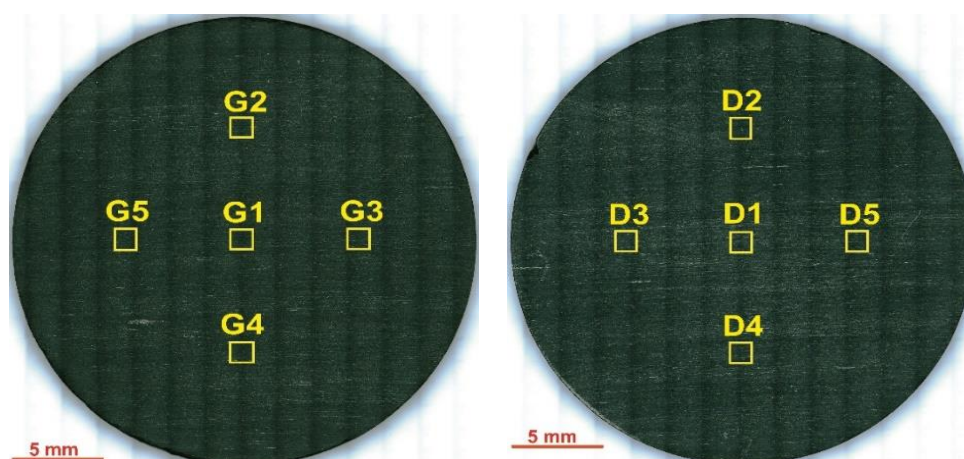
zjawiska embedmentu z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego. Materiały graficzne obejmujące wytypowane odcinki pomiarowe, dla których przeprowadzono analizy profili chropowatości oraz wgnieceń ziaren podsadzek i wycisków materiału skalnego umieszczono w formie załącznika na rysunkach od Z-13 do Z-16. Natomiast wyniki testu 4 zestawiono w tabelach 4.22, 4.24, 4.25 i 4.27.



Rdzeń górny

Rdzeń dolny

**Rys. 4.21** Suche rdzenie, przed testem 4



Rdzeń górny

Rdzeń dolny

**Rys. 4.22** Powierzchnie czołowe suchych rdzeni wraz z wytypowanymi do analiz obszarami, pod mikroskopem (obiektyw 5x), przed testem 4

**Tabela 4.21** Zestawienie danych użytych do analizy chropowatości powierzchni ścian szczeliny dla łupka, przed testem 4

Parametry	Rdzeń górny	Rdzeń dolny
Pole powierzchni czołowej rdzenia, $mm^2$	503,822 +/- 0,005	503,186 +/- 0,005
Liczba badanych obszarów	5	5
Całkowite pole powierzchni obszarów, $mm^2$	5,508 +/- 0,004	5,459 +/- 0,004
Zanalizowana powierzchnia rdzenia, %	1,09	1,08
Liczba pojedynczych odcinków pomiarowych dla profilu chropowatości	15	15
Całkowita długość profilu, $mm$	16,022 +/- 0,006	16,111 +/- 0,006
Liczba wgłębień	248	267
Liczba wzniesień	245	270

**Tabela 4.22** Wyniki chropowatości powierzchni ścian szczeliny dla łupka, przed testem 4

Parametry	Rdzeń górny	Rdzeń dolny
Chropowatość $R_a$ , mm	0,0004 +/- 0,0002	0,0003 +/- 0,0002
Średnia chropowatość $R_{a_{sr}}$ , mm	0,0004 +/- 0,0002	



Rdzeń górny

Rdzeń dolny

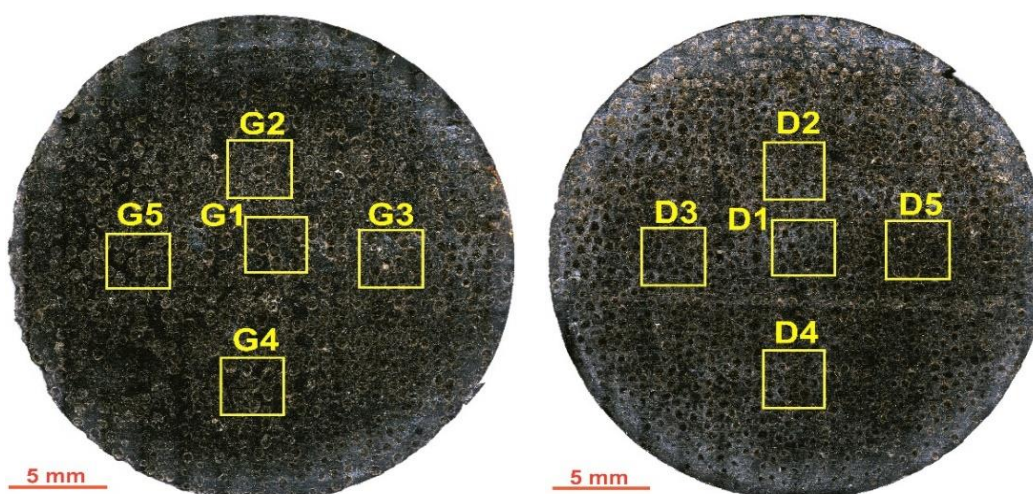
**Rys. 4.23** Powierzchnie czołowe rdzeni nasyconych płynem szczelinującym 2, przed testem 4



Rdzeń górny

Rdzeń dolny

**Rys. 4.24** Rdzenie, po teście 4



Górnny rdzeń

Dolny rdzeń

**Rys. 4.25** Powierzchnie czołowe rdzeni wraz z wytypowanymi do analiz obszarami, pod mikroskopem (obiektyw 5x, polaryzator), po teście 4

**Tabela 4.23** Zestawienie danych użytych do analizy zjawiska wgniatania ziaren podsadzki w powierzchnie ścian szczeliny z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego dla łupka, po teście 4

Parametry	Rdzeń górny	Rdzeń dolny
Pole powierzchni czołowej, $mm^2$	509,446 +/- 0,005	509,086 +/- 0,005
Liczba badanych obszarów	5	5
Całkowite pole powierzchni obszarów, $mm^2$	38,292 +/- 0,008	41,942 +/- 0,008
Zanalizowana powierzchnia rdzenia, %	7,52	8,24
Liczba pojedynczych odcinków pomiarowych profilu wgniecia i wycisków	20	20
Całkowita długość profilu, $mm$	49,762 +/- 0,015	51,578 +/- 0,015
Liczba wgniecia	50	65
Liczba wycisków	92	130

**Tabela 4.24** Wyniki badań i analiz wgniatania ziaren podsadzki w powierzchnię ścian szczeliny dla łupka, po teście 4

Parametry	Rdzeń górny	Rdzeń dolny
Wgniecenie podsadzki w powierzchnię skały		
Średnia głębokość $H_e$ , $mm$	0,082 +/- 0,032	0,056 +/- 0,018
Średnia szerokość $W_e$ , $mm$	0,416 +/- 0,104	0,398 +/- 0,072
Procentowe uszkodzenie powierzchni $PUS_e$ , %	41,84 +/- 1,52	50,13 +/- 1,91
Wycisk materiału skalnego na powierzchni skały		
Średnia wysokość $H_w$ , $mm$	0,085 +/- 0,042	0,069 +/- 0,031
Średnia szerokość $W_w$ , $mm$	0,394 +/- 0,142	0,352 +/- 0,099
Procentowe uszkodzenie powierzchni $PUS_w$ , %	36,44 +/- 2,78	44,33 +/- 3,79
<b><u>Zjawisko embedmentu z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego</u></b>		
Średnia głębokość i wysokość $H_{ew}$ , $mm$	<b>0,167 +/- 0,074</b>	<b>0,125 +/- 0,049</b>
Średnia szerokość $W_{ew}$ , $mm$	0,810 +/- 0,246	0,750 +/- 0,171
Procentowe uszkodzenie powierzchni $PUS_{ew}$ , %	<b>78,28 +/- 4,30</b>	<b>94,46 +/- 5,70</b>

**Tabela 4.25** Średnie wartości głębokości wgniecia ziarna podsadzki i wysokości wycisku materiału skalnego oraz ich szerokości dla skały łupkowej nasyconej płynem szczelinującym 2, po teście 4

Średnia głębokość i wysokość $H_{ew_{sr}}$ , $mm$	<b>0,143 +/- 0,065</b>
Średnia głębokość $H_{e_{sr}}$ , $mm$	0,067 +/- 0,028
Średnia szerokość $W_{ew_{sr}}$ , $mm$	0,775 +/- 0,206
Średnia szerokość $W_{e_{sr}}$ , $mm$	0,406 +/- 0,087

Rdzenie, użyte do testu 4 charakteryzowały się zbliżonymi wartościami pierwotnej chropowatości, tj. 0,0004 mm dla rdzenia górnego i 0,0003 mm dla rdzenia dolnego. Można więc przyjąć, że ich powierzchnie były jednakowo przygotowane.

Po teście 4 stwierdzono znacznie większą liczbę wgnieceń (wzrost o 30,00%) i wycisków (wzrost o 41,30%) dla rdzenia dolnego w stosunku do rdzenia górnego.

Zaobserwowano również znaczącą różnicę średniej głębokości wgnieceń dla poszczególnych rdzeni. Dla rdzenia górnego uzyskano wartość ( $H_e = 0,082$  mm) o 46,43% wyższą od rdzenia dolnego. Łączna średnia głębokość wgniecenia i wysokości wycisku dla rdzenia górnego ( $H_{ew} = 0,167$  mm) była wyższa o 33,60% niż dla rdzenia dolnego. Natomiast średnia szerokość wgniecenia ziarna podsadzki w rdzeń górny ( $W_e = 0,416$  mm) była o 4,52% wyższa w stosunku do rdzenia dolnego. Z kolei łączna średnia szerokość wgniecenia i szerokości wycisku dla rdzenia górnego ( $W_{ew} = 0,810$  mm) była wyższa o 8,00% od drugiego rdzenia.

Procentowe uszkodzenie powierzchni skały  $PUS_e$  przez wgniecenia ziaren podsadzki dla rdzenia dolnego 50,13%, było większe niż dla rdzenia górnego 41,84%. Podobnie uszkodzenie powierzchni skały  $PUS_{ew}$  spowodowane przez wgniecenia ziaren i wyciski materiału skalnego dla rdzenia dolnego 94,46%, było większe od rdzenia drugiego 78,28%.

Różnice w uzyskanych wielkościach dla obu rdzeni mogły być spowodowane przez nierównomierne rozmieszczenie ziaren podsadzki w płynie szczelinującym, możliwe różne wielkości ziaren wchodzących w skład materiału podsadzki oraz znacznie większą ilością zanalizowanych wgnieceń i wycisków dla rdzenia dolnego.

Wyznaczona dla ściany szczeliny średnia głębokość wgniecenia ziarna podsadzki i wysokość wycisku materiału skalnego ( $H_{ew_{sr}} = 0,143$  mm) stanowiła 21,25% średniej średnicy ziaren podsadzki  $d_{av}$ . Natomiast średnia szerokość wgniecenia ziarna podsadzki w powierzchnię skały ( $W_{e_{sr}} = 0,406$  mm) stanowiła 60,33%  $d_{av}$ . Z kolei średnia szerokość wgniecenia i wycisku ( $W_{ew_{sr}} = 0,775$  mm) stanowiła 115,16%  $d_{av}$ .

#### **4.7. Wielkości charakteryzujące zjawisko embedmentu i wycisk materiału skalnego dla szczeliny wypełnionej podsadzką w różnych wytypowanych skałach złożowych**

Przedstawione poniżej informacje i dane opisują między innymi: podatność wybranych skał złożowych na zjawisko embedmentu, wpływ technologii szczelinowania oraz wpływ składu mineralogicznego i właściwości geomechanicznych omawianych dwóch różnych skał niekonwencjonalnych na niekorzystne zjawisko. Dotyczyły one

szczeliny wypełnionej podsadzką o średniej średnicy ziaren ( $d_{av} = 0,673$  mm), przy jej koncentracji powierzchniowej, równej  $4,88$  kg/m<sup>2</sup>.

Dla piaskowca, zarówno obserwacja powierzchni czołowych rdzeni, a także uzyskane wyniki i analizy testów 1 i 2 pokazały zmiany wartości parametru  $H_{ew_c}$ . Natomiast zmiany dla parametrów  $PUS_{e_sr}$  i  $PUS_{ew_sr}$  były nieznaczne. Uzyskane wartości wielkości charakteryzujące zjawisko embedmentu i wycisk materiału skalnego dla piaskowca, zestawiono w tabeli 4.26.

**Tabela 4.26** Wielkości charakteryzujące zjawisko embedmentu i wycisk materiału skalnego w szczelinie wypełnionej podsadzką w suchej i nasyconej płynem szczelinującym skały piaskowcowej, po teście 1 i 2

<b>Parametry</b>	<b>Sucha skała, (test 1)</b>	<b>Skała nasycona płynem szczelinującym 1, (test 2)</b>
Całkowita głębokość i wysokość $H_{ew_c}$ , mm	0,101 +/- 0,051	0,167 +/- 0,077
Średnie procentowe uszkodzenie powierzchni $PUS_{e_sr}$ , %	32,35 +/- 3,02	31,70 +/- 2,76
Średnie procentowe uszkodzenie powierzchni $PUS_{ew_sr}$ , %	67,83 +/- 8,94	71,80 +/- 8,08

Wytworzona sztucznie szczelina w skale piaskowcowej nasyconej płynem szczelinującym 1 w teście 2, charakteryzowała się całkowitym wgnieciem ziaren podsadzki i wyciskiem materiału skalnego  $H_{ew_c}$  równym  $0,167$  mm. Tym samym była ona o  $65,35\%$  wyższa od wartości uzyskanej dla skały suchej. Natomiast średnie procentowe uszkodzenie powierzchni ściany szczeliny przez ziarna podsadzki ( $PUS_{e_sr} = 31,70\%$ ) dla skały nasyconej płynem było nieznacznie mniejsze w stosunku do skały nie nasyconej płynem. Z kolei łączne średnie procentowe uszkodzenie  $PUS_{ew_sr}$  powierzchni ściany szczeliny spowodowane przez wgniecenia ziaren i wycisk materiału skalnego, było w teście drugim ( $71,80\%$ ), większe niż w teście pierwszym ( $67,83\%$ ). Można tutaj stwierdzić, że nasycenie badanej skały piaskowcowej płynem szczelinującym 1 wpływało na zmianę wartości parametru  $H_{ew_c}$  z  $0,101$  mm na  $0,167$  mm. Natomiast zmiany wartości dla  $PUS_{e_sr}$  i  $PUS_{ew_sr}$  były nieznaczne.

W kolejnych testach 3 i 4, wykonanych dla łupka, zanotowano znaczące zmiany w parametrach:  $H_{ew_c}$ ,  $PUS_{e_sr}$ ,  $PUS_{ew_sr}$ . Uzyskane wartości wielkości charakteryzujące zjawisko embedmentu i wycisk materiału skalnego dla łupka, zestawiono w tabeli 4.27.

**Tabela 4.27** Wielkości charakteryzujące zjawisko embedmentu i wycisk materiału skalnego w szczelinie wypełnionej podsadzką w suchej i nasyconej płynem szczelinującym skały łupkowej, po teście 3 i 4

Parametry	Sucha skała, (test 3)	Skala nasycona płynem szczelinującym 2, (test 4)
Całkowita głębokość i wysokość $H_{ew\_c}$ , mm	0,103 +/- 0,057	0,292 +/- 0,123
Średnie procentowe uszkodzenie powierzchni $PUS_{e\_sr}$ , %	29,39 +/- 2,93	46,06 +/- 3,42
Średnie procentowe uszkodzenie powierzchni $PUS_{ew\_sr}$ , %	66,97 +/- 8,71	86,51 +/- 10,00

W przypadku skały łupkowej nasyconej płynem szczelinującym 2 (test 4), wytworzona sztucznie szczelina charakteryzowała się całkowitym wgnieceniem ziaren podsadzki i wyciskiem materiału skalnego  $H_{ew\_c}$  równym 0,292 mm. Tym samym była ona o 183,50% wyższa od wartości uzyskanej dla skały suchej. Natomiast średnie procentowe uszkodzenie  $PUS_{e\_sr}$  powierzchni ściany szczeliny przez ziarna podsadzki (46,06%) dla skały nasyconej płynem było większe niż dla skały suchej (29,39%). Z kolei łączne średnie procentowe uszkodzenie powierzchni ściany szczeliny przez wgniecenia i wycisk materiału skalnego odpowiadające wartości  $PUS_{ew\_sr}$  równej 86,51%, było większe niż dla skały nie nasyconej płynem (29,39%). Można tutaj stwierdzić, że nasylenie badanej skały łupkowej płynem szczelinującym 2 wpływało znacząco na zmianę wartości parametrów:  $H_{ew\_c}$ ,  $PUS_{e\_sr}$ ,  $PUS_{ew\_sr}$ .

#### 4.8. Analiza morfologii powierzchni skały

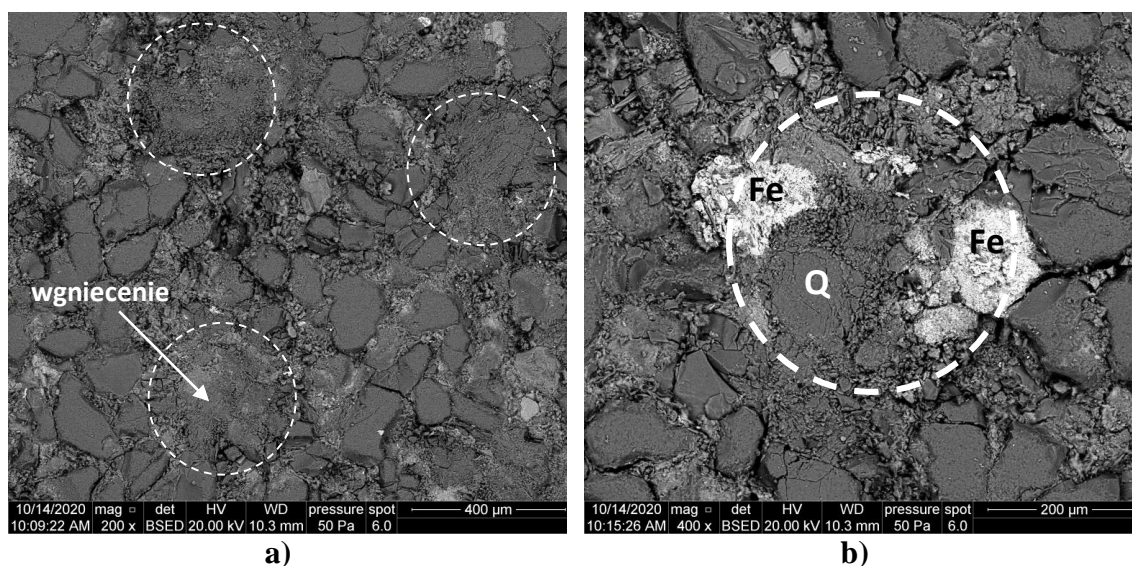
W celu dodatkowej oceny wpływu zjawiska embedmentu i wycisku materiału skalnego na zmiany powierzchni ściany szczeliny wykonano analizę morfologii. Polegała ona na wizualnej ocenie powierzchni skały, przy różnym powiększeniu jej fragmentów. Podczas analizy zwracano uwagę między innymi na: laminację w skale związaną z warunkami sedymentacji i obecnością minerałów ilastych i mik o pokroju blaszkowym; obecność kwarcu, węglanów, skaleni, żelaza, halitu, kryształów pirytu i gipsu; obecność wgnieceń ziaren podsadzki i wycisków z nich materiału skalnego; obecność spękań w skale; rozkruszenia ziaren. Pod uwagę wzięto kierunek tworzenia się łusek.

Szczególną uwagę zwracano na zjawisko kruszenia się ziaren skały w miejscach w kontakcie ziaren podsadzki ze skałą. Zjawisko to ogranicza powierzchnię ściany szczeliny dostępną dla przepływu węglowodorów ze skały do szczeliny wypełnionej podsadzką.



Z kolei powstałe w skale spękania mogą przyczyniać się do swobodniejszego przepływu węglowodorów do warstwy podsadzki.

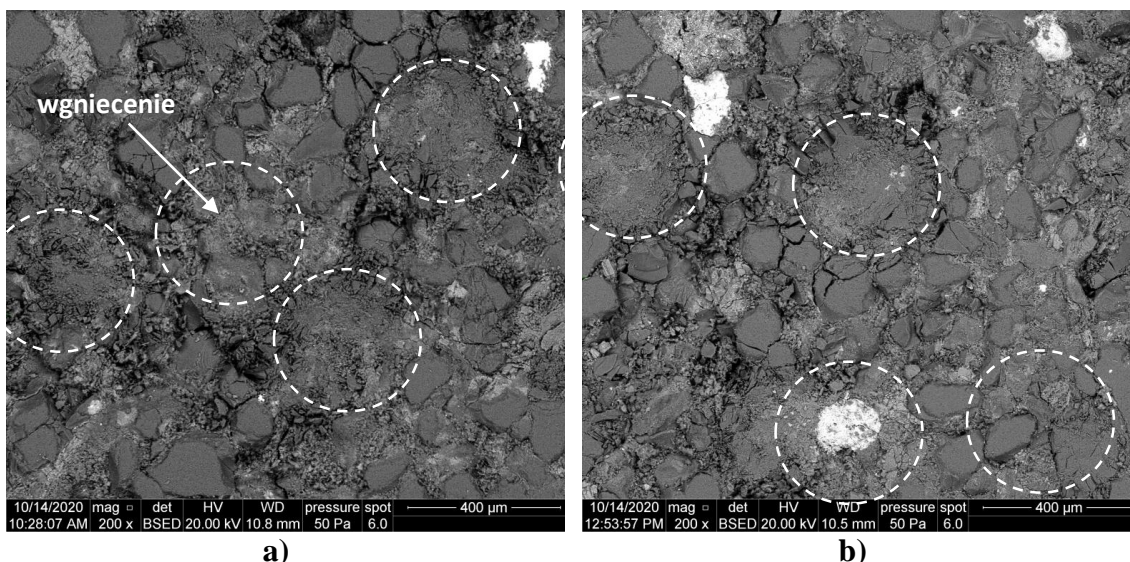
Po wykonaniu testu 1 (dla suchej skały, bez nasycania płynem szczelinującym) na powierzchni piaskowca wgniecenia były słabo widoczne. W miejscach większego nagromadzenia spoiwa (składającego się m.in. z min. ilastych, tlenków żelaza i ewaporatów) w skale widoczne były wgniecenia (Rys. 4.26a). Na zdjęciu na rysunku 4.26b widoczny jest wybrany ślad wgniecenia ziarna podsadzki. Ziarno kwarcu (Q) zostało wciśnięte w głąb skały i częściowo rozkruszone. Ziarna kwarcu sąsiadujące z wgnieceniem ulegają spękaniu.



**Rys. 4.26** Obraz powierzchni górnego rdzenia piaskowca po teście 1, z zaznaczonymi miejscami wciśnięcia ziarn podsadzki w skałę. a – pow. 200x, b – pow. 400x. Objasnienia: Fe – tlenki żelaza, Q – kwarc

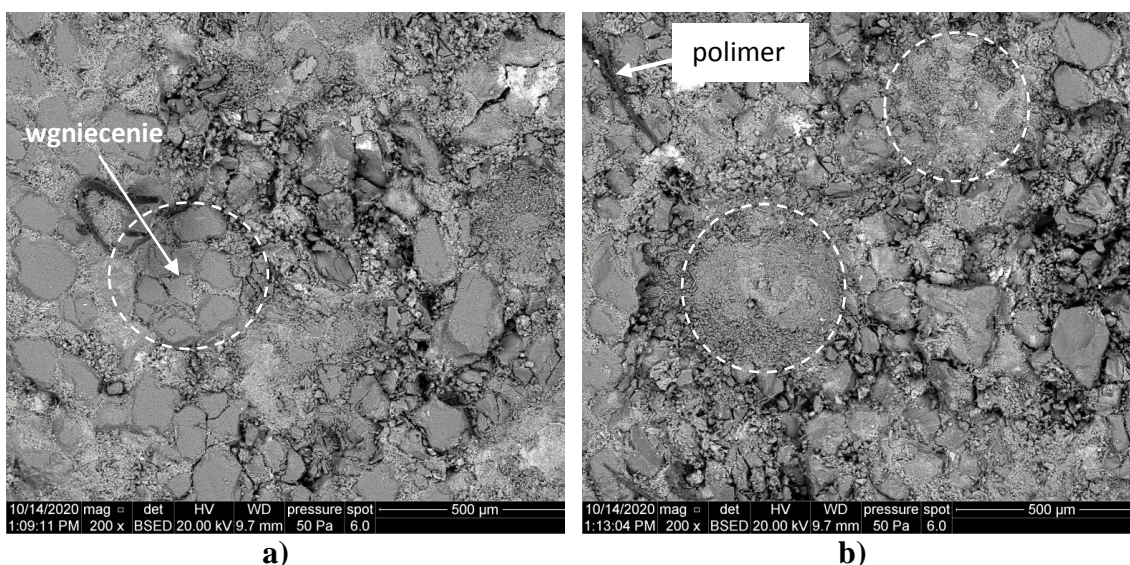
W przypadku powierzchni dolnego rdzenia piaskowca (po przeprowadzeniu testu 1) zmiany są bardzo zbliżone do rdzenia górnego. Wgniecenia tworzą się tutaj przeważnie w miejscach nagromadzenia minerałów budujących spoiwo skały (Rys. 4.27a, b).





**Rys. 4.27** Obraz powierzchni dolnego rdzenia piaskowca po teście 1, z zaznaczonymi miejscami wcisku ziarn podsadzki w skałę. a, b – pow. 200x

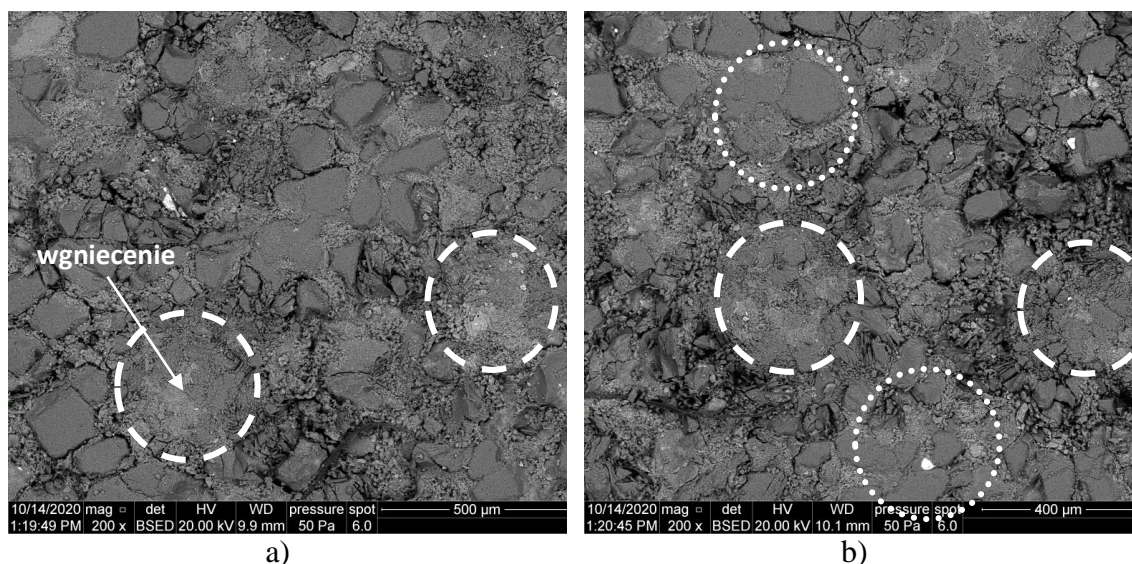
W przypadku obserwacji próbki piaskowca po przeprowadzeniu testu 2 (dla skały nasyconej płynem szczelinującym), stwierdzono, iż obecność płynu szczelinującego spowodowała uplastycznienie skały (głównie spoiwa), stąd odkształcenia nie mają charakteru kruchego, a raczej plastyczne. Widać, iż ziarna kwarcu są wcisnięte w głąb skały (Rys. 4.28).



**Rys. 4.28** Obraz powierzchni górnego rdzenia piaskowca po teście 2, z zaznaczonymi miejscami wcisku ziarn podsadzki w skałę. a, b – pow. 180x

Na zdjęciu (Rys. 4.28) widoczne są wciski w obrębie spoiwa skały. W lewym górnym rogu widoczne włókno polimeru pozostałego po płynie szczelinującym. W niektórych przypadkach, chociaż rzadziej, wgniatanie ziaren podsadzki powoduje również odkształcenia kruche.

Na dolnej powierzchni rdzenia piaskowca, po przeprowadzeniu testu 2, również wgniecenia najczęściej widoczne są w obrębie spoiwa piaskowca. Ziarna kwarcu przeważnie są nienaruszone (Rys. 4.29a). Wgniecenia w obrębie spoiwa były wyraźnie widoczne (linia przerywana), natomiast w miejscach koncentracji ziaren kwarcu widoczne było wygładzenie powierzchni, ale nie widać zagłębienia (linia kropkowana), (Rys. 4.29b).

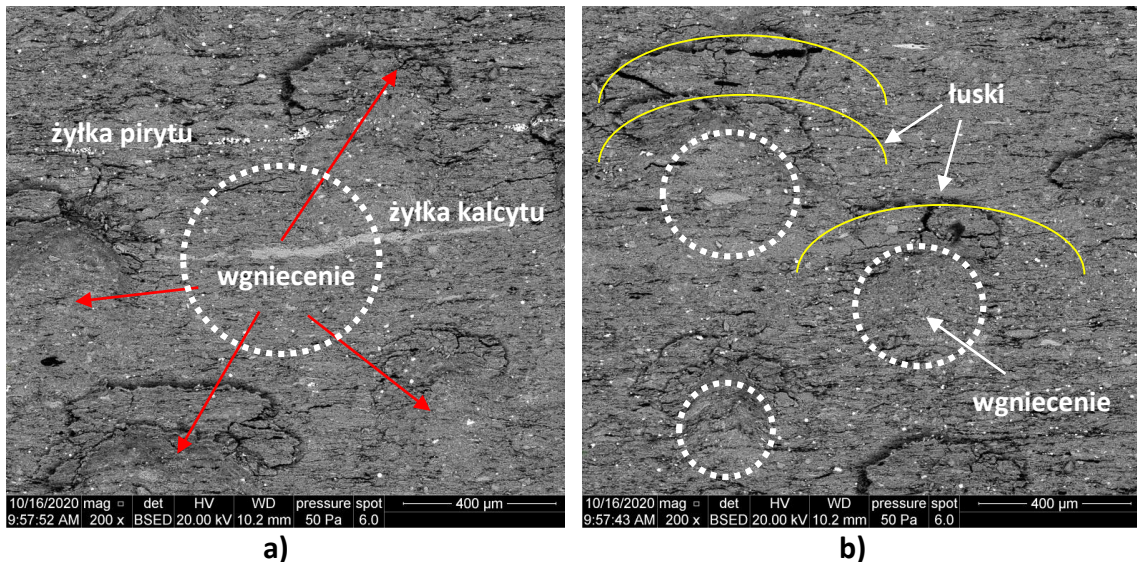


Rys. 4.29 Obraz powierzchni dolnego rdzenia piaskowca po teście 2, z zaznaczonymi miejscami wcisku ziarn podsadzki w skałę. a – pow. 180x, b – pow. 200x

W przypadku skały łupkowej zmiany w morfologii powierzchni po wykonaniu testów zjawiska embedmentu, są wyraźniej widoczne. Wyraźnie wzrasta też zagęszczenie wgnieceń w stosunku do zmian na powierzchni rdzenia piaskowca. Wynika to prawdopodobnie z faktu, iż w sytuacji gdy ziarna podsadzki natrafiają na ziarna kwarcu w piaskowcu nie następują wyraźne wgniecenia powierzchni.

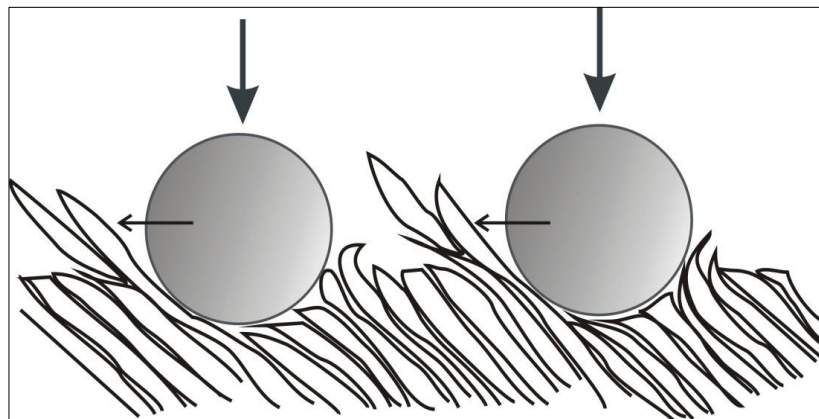
Poniższe fotografie (Rys. 4.30) pokazują morfologię górnej powierzchni rdzenia skały łupkowej po przeprowadzeniu testu 3 (dla suchej skały, bez nasycania płynem szczelinującym). Widoczne są tu ślady wgnieceń ziaren podsadzki. Wgnieceniom tym towarzyszyło uszkodzenie powierzchni skały, polegające na utworzeniu spękań i łusek, powstałych z wyciśnięcia i oderwania materiału skalnego. W niektórych przypadkach występowała sekwencja co najmniej dwóch łusek, przypominająca formę dupletu tektonicznego (Rys. 4.30b).





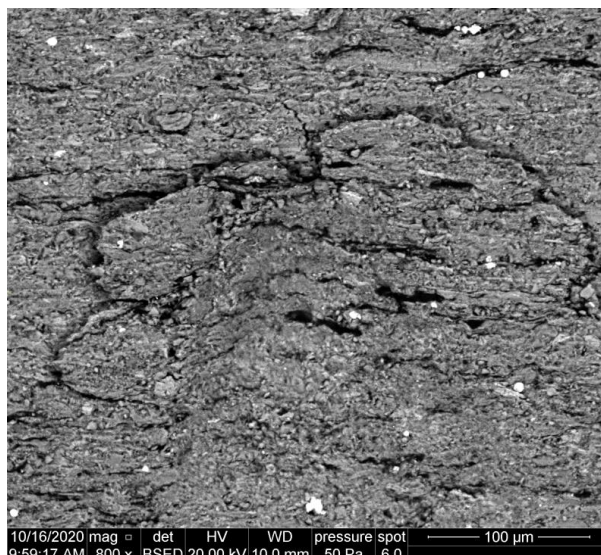
**Rys. 4.30** Obraz powierzchni górnego rdzenia łupka po teście 3, z zaznaczonymi miejscami wgnieceń. a, b – pow. 200x

Generacja łusek była tutaj uprzywilejowana tylko w jednym kierunku (w górę obrazu na zdjęciach powyżej – Rys. 4.30), co może wynikać z ułożenia laminacji w skale w stosunku do powierzchni wytworzonej szczeliny.



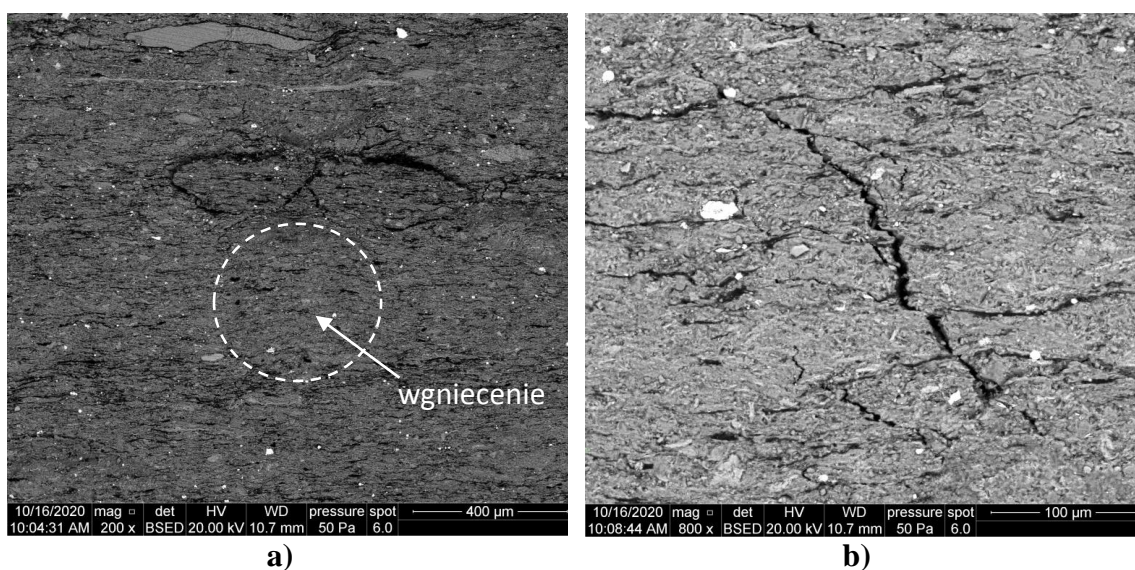
**Rys. 4.31** Szkic przedstawiający mechanizm tworzenia się łusek, podczas wgnięcia ziaren podsadzki w powierzchnię suchej skały łupkowej

Powyższy szkic (Rys. 4.31) przedstawia mechanizm tworzenia się łusek, w wyniku oderwania fragmentów skały wzdłuż powierzchni uławicenia, w sytuacji, gdy te powierzchnie są nachylone w stosunku do powierzchni wytworzonej szczeliny.



**Rys. 4.32** Obraz fragmentu powierzchni skały łupkowej po teście 3, pod mikroskopem (pow. 800x)

Na powyższym zdjęciu (Rys. 4.32) widać jeden wybrany ślad wgniecenia ziarna podsadzki (4-krotne powiększenie w stosunku do poprzednich zdjęć). W centralnej części wgniecenia łuseczki minerałów budujących skałę są zgniecione, natomiast powyżej wyraźnie widać odspojenie i oderwanie fragmentów skały w formie łusek.

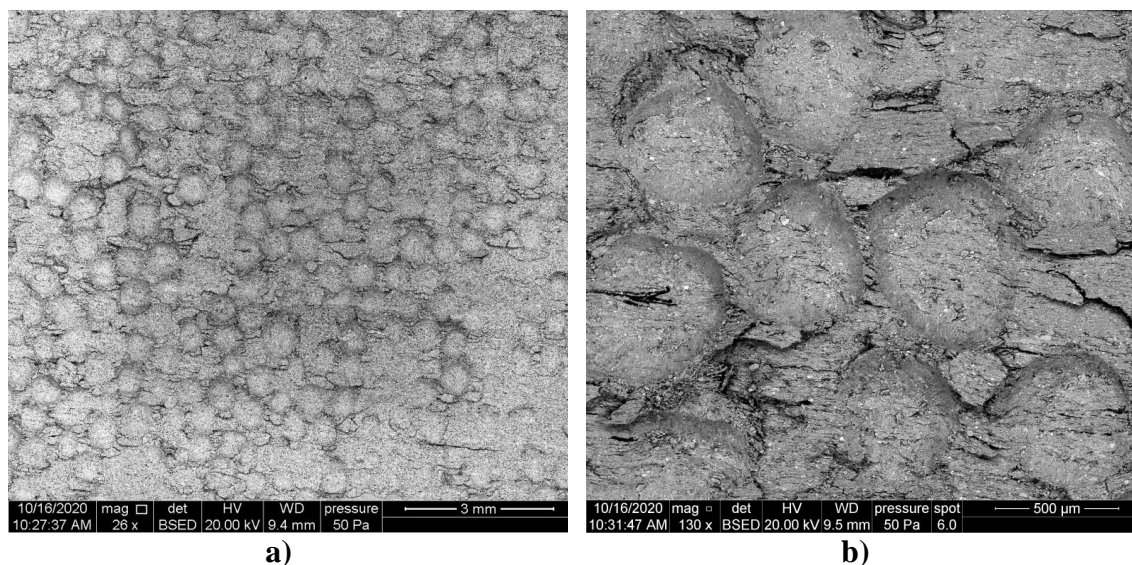


**Rys. 4.33** Obraz powierzchni dolnego rdzenia łupka po teście 3, z zaznaczonymi miejscami wgnieceń. a – pow. 200x, b – pow. 800x

Wgniecenia na dolnej powierzchni rdzenia skały łupkowej po przeprowadzeniu testu 3 są mniej wyraźne. Tworzenie się łusek z oderwania było tutaj również rzadsze (Rys. 4.33a). Wgnieceniom natomiast często towarzyszyły liczne spękania, powodujące kruszenie skały (Rys. 4.33b). Spękania nie zawsze w widoczny sposób związane były z wgnieceniami. Często przecinały powierzchnię rdzenia w formie sieci spękań.



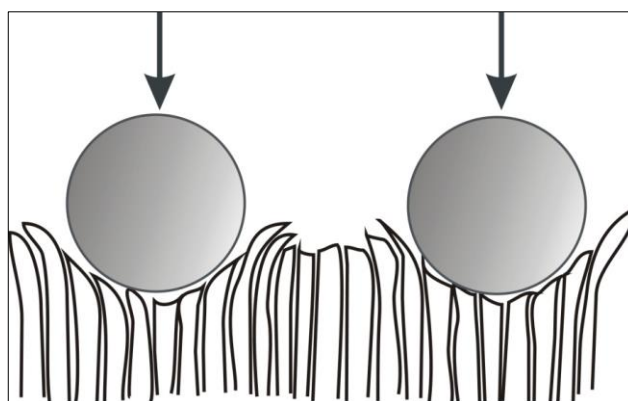
Po przeprowadzeniu na skałę łupkowej testu 4 (dla skały nasyconej płynem szczelinującym), przy niewielkim powiększeniu (26x), widać iż cała powierzchnia próbki pokryta jest w sposób regularny, wgnieceniami (Rys. 4.34a).



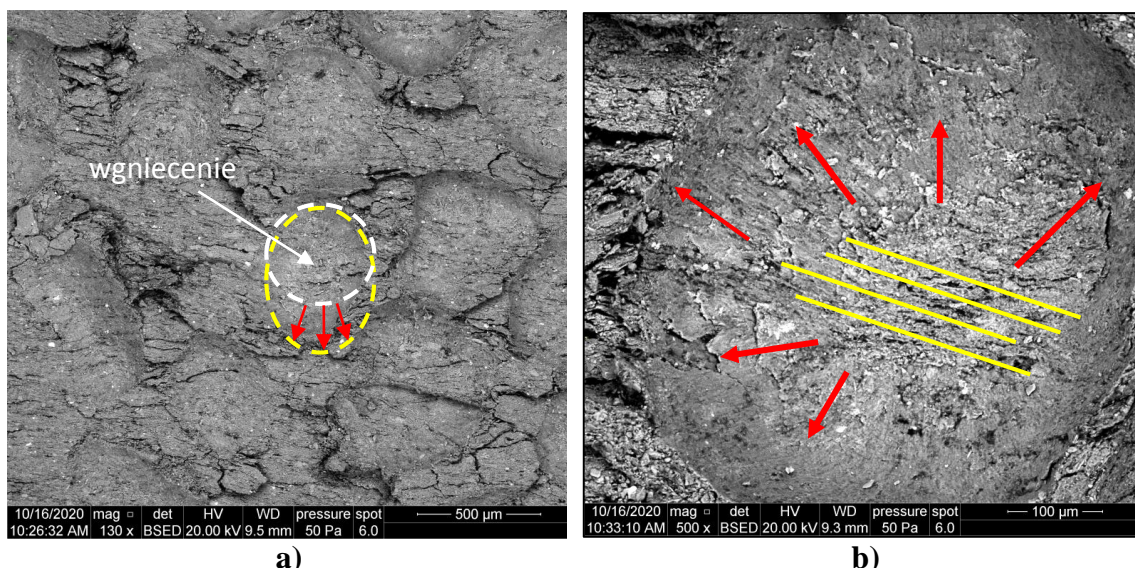
**Rys. 4.34** Obraz powierzchni górnego rdzenia łupka po teście 4. a – pow. 26x, b – pow. 130x

Tak duża liczba wgnieceń wynika z uplastycznienia skały, wskutek działania płynu szczelinującego. Pomędzy okrągłymi wgnieceniami materiał skalny był wyraźnie wyciśnięty ku górze, ale odspojenia miały bardziej kruchy charakter. Wyciśnięte fragmenty były spękane i odspojone w postaci łusek. Spękania ułożone były zgodnie z powierzchniami laminacji w skale (Rys. 4.34b). Widać było tu, że powierzchnia próbki została wycięta prostopadle w stosunku do warstwowania.

W sytuacji, gdy powierzchnie laminacji w skale są prostopadłe w stosunku do powierzchni przecięcia (wytworzonej szczeliny) wilgotny materiał skalny wyciskany był równomiernie wokół ziarna podsadzki, według schematu pokazanego na rysunku 4.35. Skała typu łupkowego łatwo pękała w płaszczyznach zgodnych z warstwowaniem.



**Rys. 4.35** Szkic przedstawiający mechanizm tworzenia się łusek, podczas wgniataania ziaren podsadzki w powierzchnię skały łupkowej nasyconej płynem

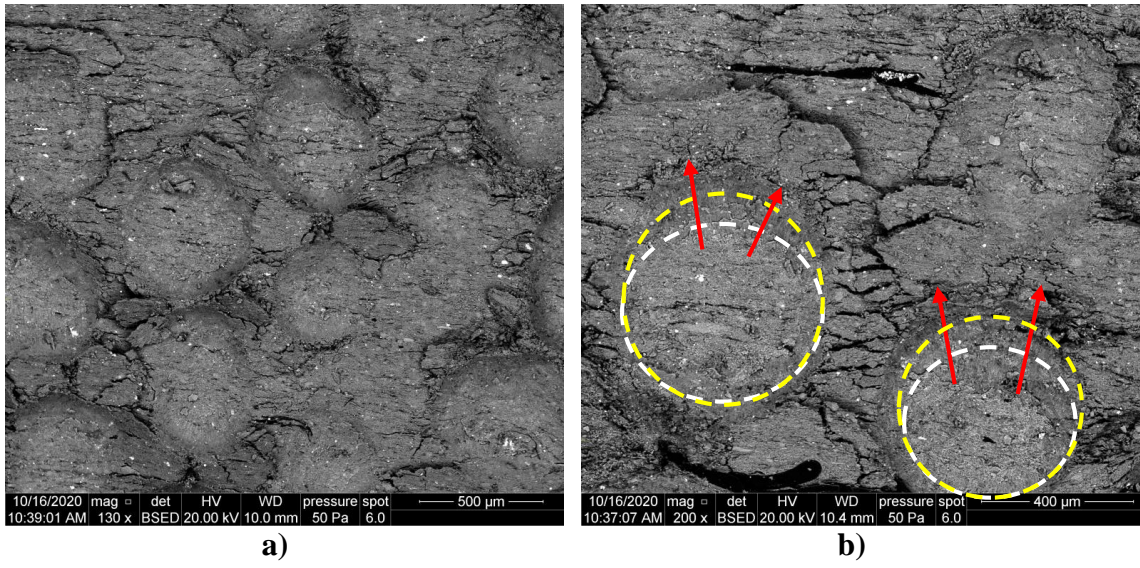


**Rys. 4.36** Obraz powierzchni górnego rdzenia łupka po teście 4. a – pow. 130x, b – pow. 500x. Objaśnienia w tekście

W przypadku, gdy powierzchnie uławiczenia układały się skośnie w stosunku do powierzchni przecięcia próbki, następował poślizg ziarna propantu. Wskazuje na to kierunek przemieszczeń wyciśniętego materiału i widocznych w nim spękań. Wciski mają wtedy nieco wydłużony kształt, gdyż oprócz wgniecenia ziarna podsadzki następuje też jego przemieszczenie z poślizgu (Rys. 4.36a). W zbliżeniu pojedynczego wgniecenia (Rys. 4.36b, pow. 500x) widać było wtórne ułożenie minerałów blaszkowych, spowodowane uplastycznieniem próbki (czerwone strzałki). W centralnej części wcisku widoczny był pierwotny kierunek uławiczenia próbki (żółte linie), prostopadły w stosunku do powierzchni próbki.

Powierzchnia dolnego rdzenia skały łupkowej, po wykonaniu testu 4 widoczna jest na rysunku 4.37. Zjawiska zachodzące na powierzchni skały dla dolnego rdzenia są bardzo podobne do tych udokumentowanych dla górnego rdzenia. Wyciśnięty materiał jest spękany i łuskowo odspojony (Rys. 4.37a). Kształt wcisków jest również okrągły, lub nieco wydłużony (owalny) w przypadku gdy nastąpił poślizg ziarna podsadzki, co pokazano na rysunku 4.37b. Podobnie jak dla górnego rdzenia, również i na dolnej powierzchni wytworzonej szczeliny w sytuacji, gdy powierzchnie uławiczenia układają się skośnie w stosunku do powierzchni próbki, materiał skalny wyciskany był silniej w kierunku przeciwnym do nachylenia laminacji. Wskazywał na to kierunek przemieszczeń wyciśniętego materiału i widocznych w nim spękań.





**Rys. 4.37** Obraz powierzchni dolnego rdzenia łupka po teście 4. a – pow. 130x, b – pow. 200x



## 5. Analiza wpływu zjawiska embedmentu na efektywność podsadzenia szczeliny

W dalszej części pracy przedstawiono analizę wpływu zjawiska embedmentu, z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego na efektywność podsadzenia szczeliny w badanych skałach złożowych. Dotyczyła ona szczeliny wypełnionej podsadzką o średniej średnicy ziaren ( $d_{av} = 0,673$  mm), przy koncentracji powierzchniowej  $4,88$  kg/m<sup>2</sup>. Uzyskane parametry zestawiono w tabelach dla suchych skał oraz nasyconych płynami szczelinującymi. Należały do nich między innymi:

- maksymalna możliwa do osiągnięcia rozwartość szczeliny z podsadzką  $W_{fm}$ ,
- efektywna rozwartość szczeliny z podsadzką  $W_{f,ef}$ ,
- procentowa efektywna rozwartość szczeliny z podsadzką  $PEWF$ ,
- procentowa efektywna powierzchnia ściany szczeliny (skały) z warstwą podsadzki  $PEPS$ .

Wyznaczono je według metodyki opisaną w rozdziale 3.13, w oparciu o dane uzyskane z czterech testów zaprezentowanych w rozdziałach 4.6 i 4.7.

Parametry charakteryzujące efektywność podsadzenia szczeliny w suchej skale piaskowcowej oraz nasyconej płynem szczelinującym 1, zestawiono w tabeli 5.1. Z kolei wielkości wyznaczone dla suchej skały łupkowej oraz nasyconej płynem szczelinującym 2, zestawiono w tabeli 5.2. Uwzględniały one między innymi: podatność wybranych skał złożowych na zjawisko embedmentu oraz wpływ technologii szczelinowania, składu mineralnego i właściwości geomechanicznych badanych dwóch różnych skał niekonwencjonalnych na efektywność podsadzenia szczeliny.

**Tabela 5.1** Efektywność podsadzenia szczeliny przez ziarna podsadzki dla suchej i nasyconej płynem szczelinującym skały piaskowcowej ( $T=127,5$  °C,  $P_{ef}= 86,5$  MPa)

Parametry	Szczelina w suchej skale, (test 1)	Szczelina w skale nasyconej płynem szczelinującym 1, (test 2)
Maksymalna możliwa do osiągnięcia rozwartość szczeliny z podsadzką (przy $4,88$ kg/m <sup>2</sup> ) $W_{fm}$ , mm	2,320 +/- 0,002	2,320 +/- 0,002
Efektywna rozwartość szczeliny z podsadzką $W_{f,ef}$ , mm	<b>2,219</b> +/- 0,053	<b>2,153</b> +/- 0,079
Procentowa efektywna rozwartość szczeliny z podsadzką $PEWF$ , %	<b>95,65</b> +/- 2,22	<b>92,80</b> +/- 3,33
Procentowa efektywna powierzchnia ściany szczeliny (skały) z warstwą podsadzki $PEPS$ , %	<b>67,65</b> +/- 1,52	<b>68,30</b> +/- 1,39

**Tabela 5.2** Efektywność podsadzenia szczeliny przez ziarna podsadzki dla suchej i nasyconej płynem szczelinującym skały łupkowej ( $T=96,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{ef} = 65,5\text{ MPa}$ )

Parametry	Szczelina w suchej skale, (test 3)	Szczelina w skale nasyconej płynem szczelinującym 2, (test 4)
Maksymalna możliwa do osiągnięcia rozwarłość szczeliny z podsadzką (przy $4,88\text{ kg/m}^2$ ) $W_{fm}$ , mm	2,430 +/- 0,002	2,430 +/- 0,002
Efektywna rozwarłość szczeliny z podsadzką $W_{f.ef}$ , mm	2,327 +/- 0,059	2,138 +/- 0,115
Procentowa efektywna rozwarłość szczeliny z podsadzką $PEWF$ , %	95,76 +/- 2,34	87,98 +/- 5,30
Procentowa efektywna powierzchnia ściany szczeliny (skały) z warstwą podsadzki $PEPS$ , %	70,61 +/- 1,47	53,94 +/- 1,71

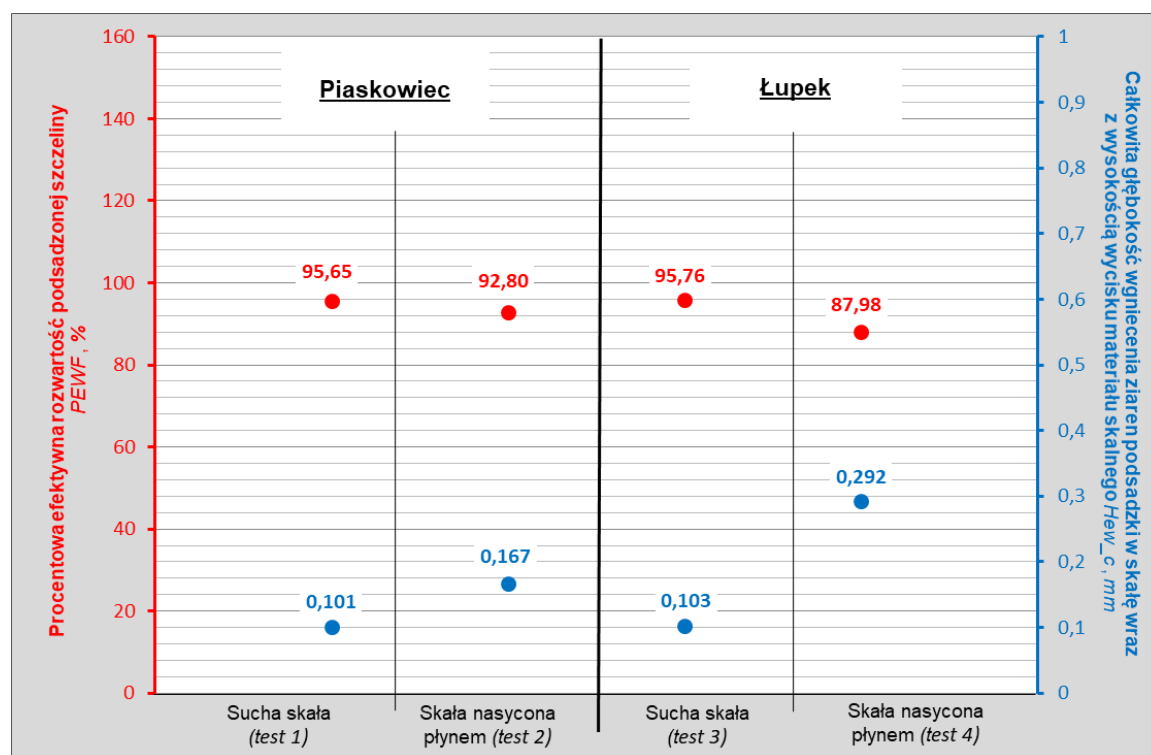
Parametry, takie jak  $W_{fm}$ ,  $W_{f.ef}$  i  $PEWF$ , wpływają na przepływ węglowodorów przez podsadzoną propanem szczelinę do odwiertu. Natomiast parametr  $PEPS$  wpływa na obszar dostępny dla przepływu węglowodorów ze skały do wytworzonej szczeliny.

Efektywna rozwarłość szczeliny  $W_{f.ef}$  dla skały piaskowcowej nasyconej płynem szczelinującym 1 była równa 3,07 mm. Tym samym charakteryzowała się ona wartością nieznacznie niższą o 2,94% w stosunku do skały suchej. Uwzględniono tutaj maksymalną możliwą do osiągnięcia rozwarłość szczeliny z podsadzką ( $W_{fm} = 2,320\text{ mm}$ ) o koncentracji powierzchniowej  $4,88\text{ kg/m}^3$ , dla zadanych warunków temperatury i naprężenia ściskającego szczelinę w testach 1 i 2. Rozwarłość szczeliny w skale nasyconej płynem zmniejszyła się nieznacznie o 7,20%, a dla skały suchej o 4,35% w stosunku do maksymalnej możliwej do uzyskania rozwarłości szczeliny w zadanych warunkach  $T$  i  $P_z$ . Tym samym procentowa efektywna rozwarłość  $PEWF$  dla szczeliny w skale suchej (92,80%) była nieznacznie mniejsza od skały piaskowcowej nasyconej płynem (95,65%). Natomiast efektywna powierzchnia ściany szczeliny  $PEPS$  wynosząca 68,30% była zbliżona do wartości wyznaczonej dla piaskowca w postaci suchej.

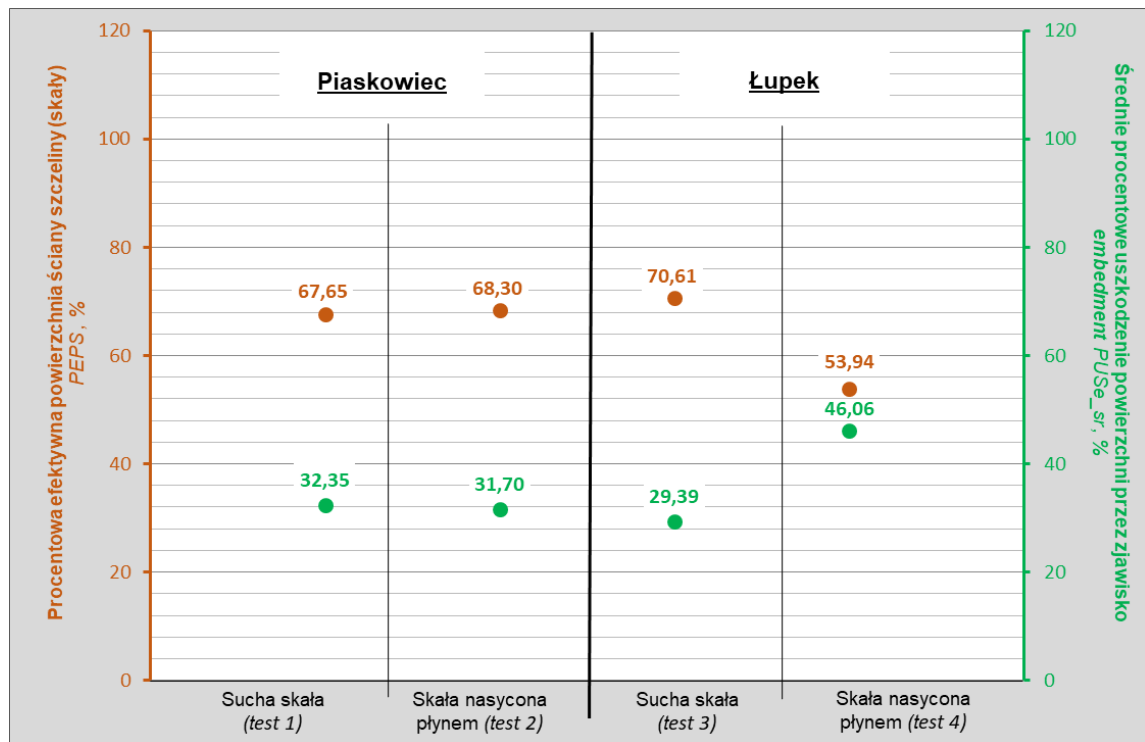
W przypadku skały łupkowej nasyconej płynem szczelinującym 2, efektywna rozwarłość szczeliny  $W_{f.ef}$  była równa 2,138 mm. Wartość ta, była nieznacznie niższa o 8,12% od wartości wyznaczonej dla skały suchej. Uwzględniono tutaj maksymalną możliwą do osiągnięcia rozwarłość szczeliny z podsadzką ( $W_{fm} = 2,430\text{ mm}$ ) o koncentracji powierzchniowej  $4,88\text{ kg/m}^3$ , dla zadanych warunków temperatury i ciśnienia ściskającego szczelinę w testach 3 i 4. Rozwarłość szczeliny w skale nasyconej płynem zmniejszyła się

nieznacznie o 12,02%, a dla skały suchej o 4,24% w stosunku do maksymalnej możliwej do uzyskania rozwartości szczeliny w zadanych warunkach  $T$  i  $P_z$ . Tym samym procentowa efektywna rozwartość  $PEWF$  dla szczeliny w skale nasyconej płynem i wynosząca 87,98%, była nieznacznie mniejsza niż dla skały suchej 95,76%. Natomiast efektywna powierzchnia ściany szczeliny  $PEPS$  wynosząca 53,94% była mniejsza od wartości wyznaczonej dla łupka w postaci suchej, równej 70,61%.

Dodatkowo, na poniższych wykresach zestawiono wielkości zjawiska embedmentu i wycisku materiału skalnego z efektywnością podsadzenia szczeliny, które przyczyniają się do zmniejszenia przepływu węglowodorów do odwiertu (Rys. 5.1) oraz ich przepływu ze skały do wytworzonej szczeliny z podsadzką (Rys. 5.2).



**Rys. 5.1** Zestawienie parametrów wpływających na podsadzenie szczeliny propantem, umożliwiające przepływ węglowodorów do odwiertu dla dwóch różnych skał złożowych



**Rys. 5.2** Zestawienie parametrów wpływających na podszycie szczeliny propantem, umożliwiającej przepływ węglowodorów ze skały do szczeliny dla dwóch różnych skał złożowych

### **Wpływ zjawiska embedmentu z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego na efektywność podszycia szczeliny wraz z zaproponowaną oceną jej klasyfikacji dla różnych zadanych koncentracji powierzchniowych podszyci**

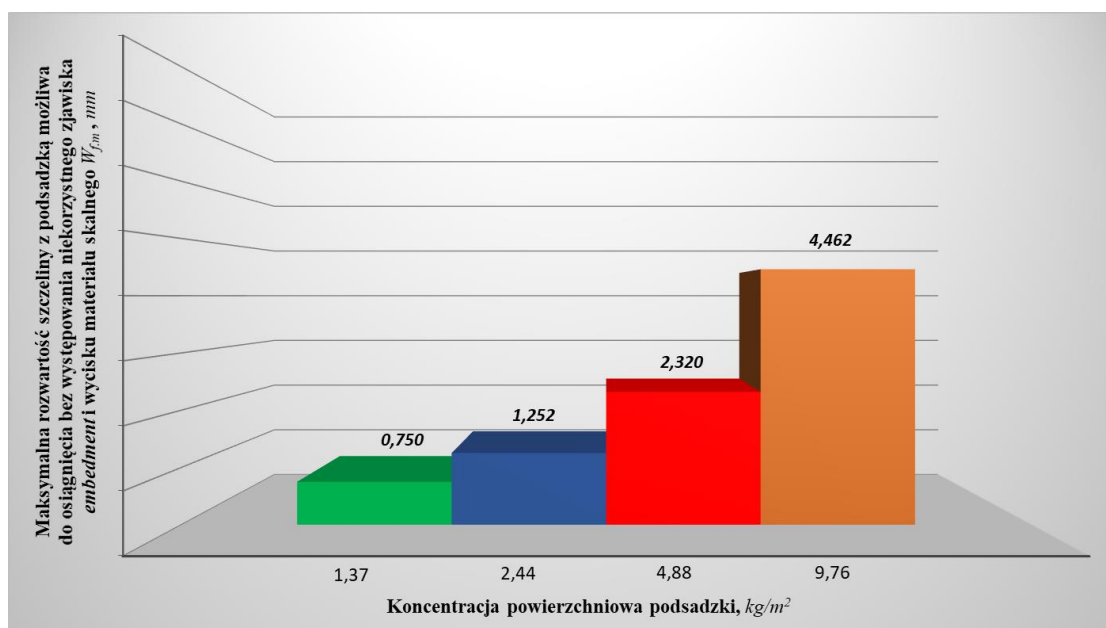
Po wykonanym zabiegu stymulacyjnym w złożach niekonwencjonalnych, często tworzą się sieci licznych dodatkowych szczelin o różnej rozwarości. Połączone są one z główną szczeliną. Poprzez wytworzenie się sieci szczelin uzyskuje się zwiększony obszar kontaktu ze skałą złożową, a tym samym efektywniejsze wykonanie zabiegu stymulacyjnego.

Dodatkowo wykonano teoretyczne analizy wpływu zjawiska embedmentu z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego na efektywność podszycia szczelin o różnej rozwarości. W tym celu wykorzystano parametry wyznaczone dla szczelin charakteryzujących się warstwą podszyci o koncentracji powierzchniowej  $4,88 \text{ kg/m}^2$  w testach 1, 2, 3, 4:  $W_{fm}$ ,  $W_{f.ef}$ ,  $PEWF$ ,  $PEPS$ . Uwzględniały one: temperaturę, naprężenie ściskające, kruszenie i reorientację ziaren oraz czas ich działania na szczelinę wypełnioną podszycą. Do ich analizy zaproponowano teoretyczną symulację wykonaną dla pozostałych koncentracji powierzchniowych:  $1,37 \text{ kg/m}^2$  (odpowiadająca ułożeniu jednej warstwy ziaren podszyci, z ang. *monolayer*),  $2,44 \text{ kg/m}^2$  i  $9,76 \text{ kg/m}^2$  (odpowiadające

kilku warstwom ziaren podsadzki). Dla wszystkich analizowanych koncentracji podsadzki przyjęto taką samą wartość parametru *PEPS* (wyznaczonego w testach 1, 2, 3 i 4). Z kolei do wyznaczenia wielkości  $W_{fm}$  użyto procedury badawcze opisanej w rozdziale 3.13, w której zamiast rdzeni skalnych użyto stalowe kształtki cylindryczne, aby wyeliminować zjawisko embedmentu i wycisk materiału skalnego. Analiza szczelin o różnej koncentracji powierzchniowej podsadzki, pokazuje wpływ składu mineralnego i właściwości geomechanicznych wytypowanych skał na prezentowane niekorzystne zjawisko oraz efektywność podsadzenia szczeliny.

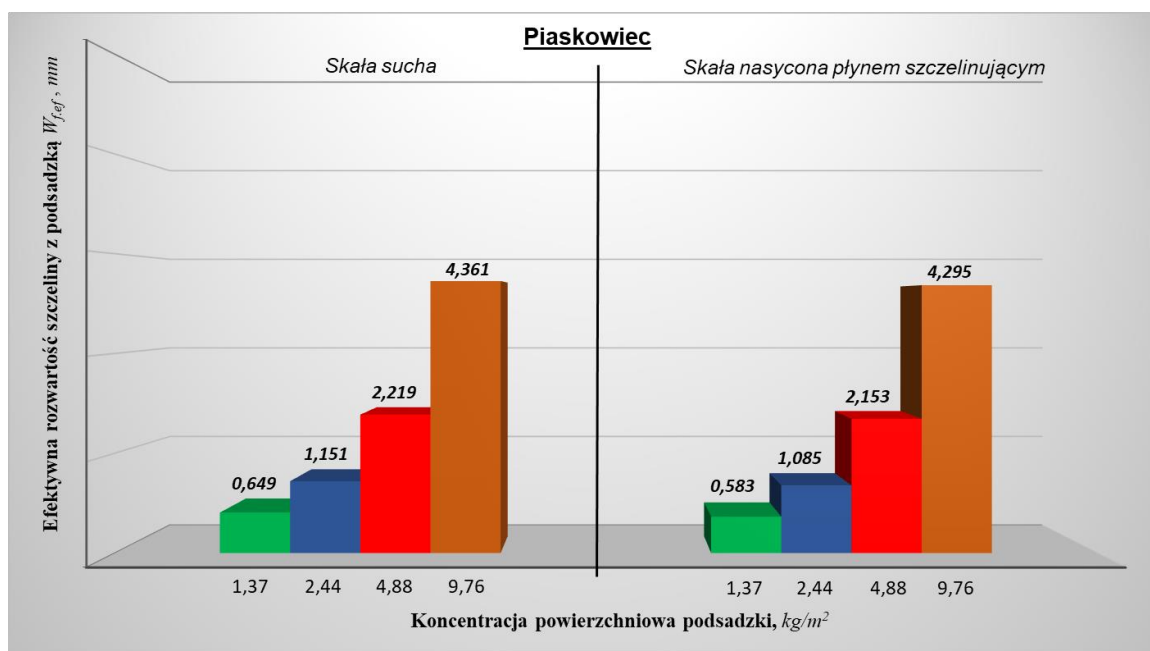
### Piaskowiec

W pierwszej kolejności pokazano na wykresie (Rys. 5.3) maksymalne możliwe do uzyskania rozwartości  $W_{fm}$  szczeliny dla czterech różnych koncentracji powierzchniowych podsadzki. Maksymalne ich wartości odpowiadały wcześniej przyjętym dla piaskowca warunkom: temperatury 127,5 °C, ciśnienia ściskającego szczelinę wypełnioną podsadzką 86,5 MPa i czasu ich działania 6 godzin.

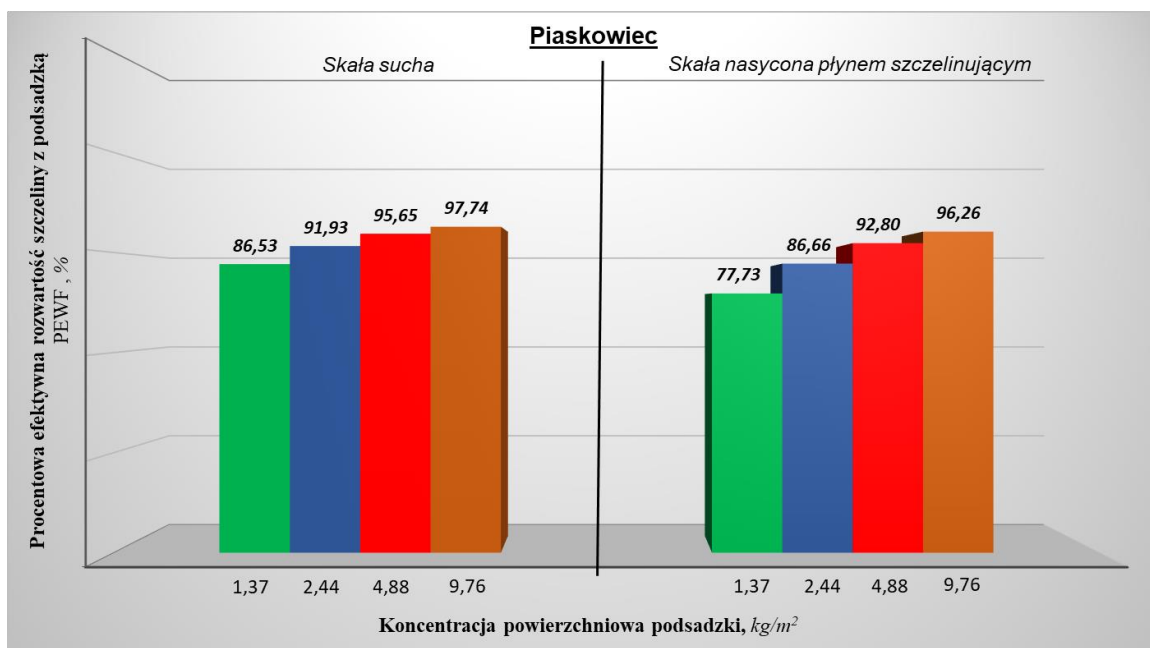


**Rys. 5.3** Maksymalna możliwa do uzyskania rozwartość szczeliny bez zjawiska embedmentu i wycisku dla różnych koncentracji powierzchniowych podsadzki ceramicznej ISP 20/40 w 127 °C, przy 86,5 MPa

Na kolejnych wykresach (Rys. 5.4 i 5.5) przedstawiono ocenę wpływu zjawiska embedmentu z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego na efektywną rozwartość szczeliny oraz procentową efektywną jej rozwartość, dla suchej i nasyconej płynem szczelinującym skały piaskowcowej.



**Rys. 5.4** Efektywna rozwartość szczeliny z podsadzką ceramiczną ISP 20/40 o różnej jej koncentracji powierzchniowej z uwzględnieniem zjawiska embedmentu wraz z wyciskiem materiału skalnego, dla piaskowca w 127 °C, przy 86,5 MPa



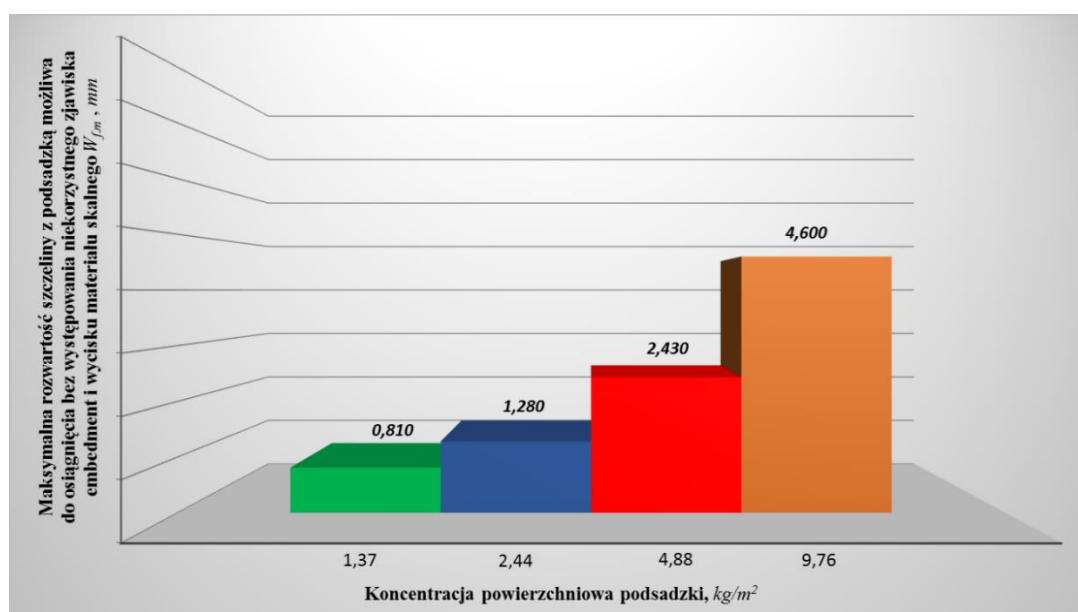
**Rys. 5.5** Procentowa efektywna rozwartość szczeliny z podsadzką ceramiczną ISP 20/40 o różnej jej koncentracji powierzchniowej z uwzględnieniem zjawiska embedmentu wraz z wyciskiem materiału skalnego, dla piaskowca w 127 °C, przy 86,5 MPa

Największy procentowy spadek maksymalnej rozwartości szczeliny otrzymano dla skały piaskowcowej nasyconej płynem, przy koncentracji powierzchniowej podsadzki 1,37  $kg/m^2$ . Efektywna rozwartość szczeliny zmniejszyła się z 0,750 mm do 0,583 mm. Odpowiadało to zmniejszeniu się maksymalnej pierwotnej rozwartości szczeliny

o 22,27%. Natomiast dla suchej skały odnotowano zmniejszenie się pierwotnej rozwartości szczeliny o 13,47%, tj. do wartości 0,649 mm. Najmniejszy procentowy spadek rozwartości szczeliny, stanowiący 2,26% jej maksymalnej rozwartości ( $W_{fm} = 4,462$  mm) otrzymano dla suchej skały, przy największej koncentracji powierzchniowej podsadzki, równej  $9,76 \text{ kg/m}^2$ . Z kolei efektywna rozwartość takiej szczeliny zmniejszyła się do 4,361 mm. Natomiast dla skały nasyconej płynem szczelinującym zanotowano zmniejszenie efektywnej rozwartości szczeliny o 3,74%, tj. do wartości 4,295 mm.

### Łupek

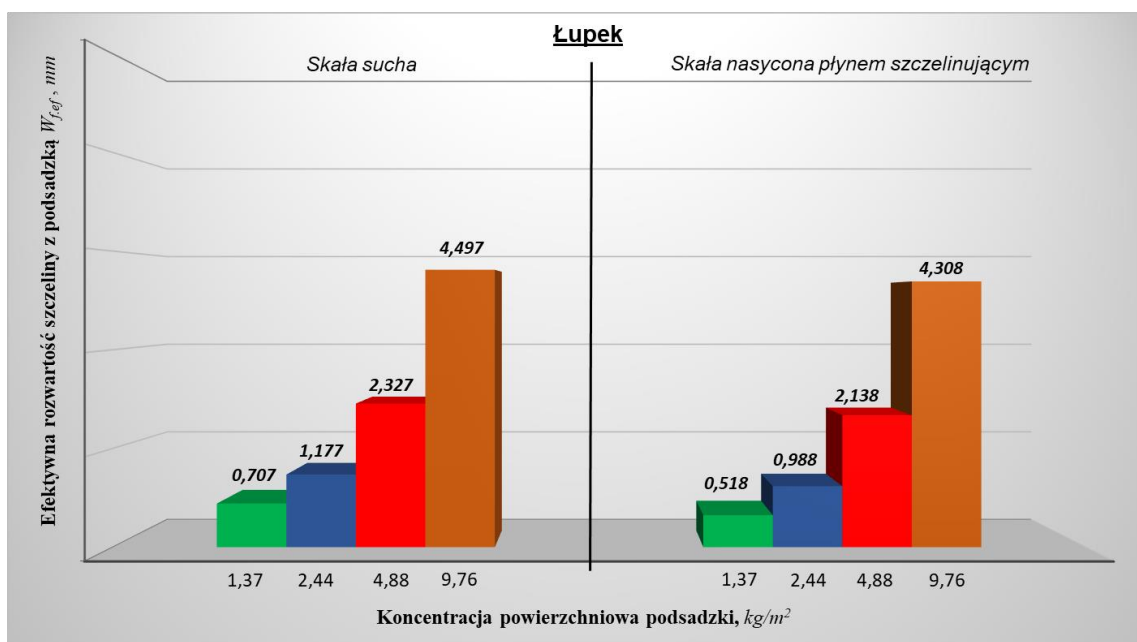
Podobnie jak w przypadku skały piaskowcowej, wyznaczono maksymalne możliwe do uzyskania rozwartości szczeliny (Rys. 5.6). Na podstawie ich określono efektywną rozwartość szczeliny dla czterech różnych koncentracji powierzchniowych podsadzki. Uwzględniono także wpływ temperatury, wielkość naprężenia ściskająca oraz czasu ich działania, a także kruszenie i reorientację ziaren. Maksymalne rozwartości szczeliny odpowiadały wcześniej przyjętym dla łupka warunkom: temperatury  $96,5 \text{ }^\circ\text{C}$ , ciśnienia ściskającego szczelinę wypełnioną podsadzką  $65,5 \text{ MPa}$  i czasu ich działania 6 godzin.



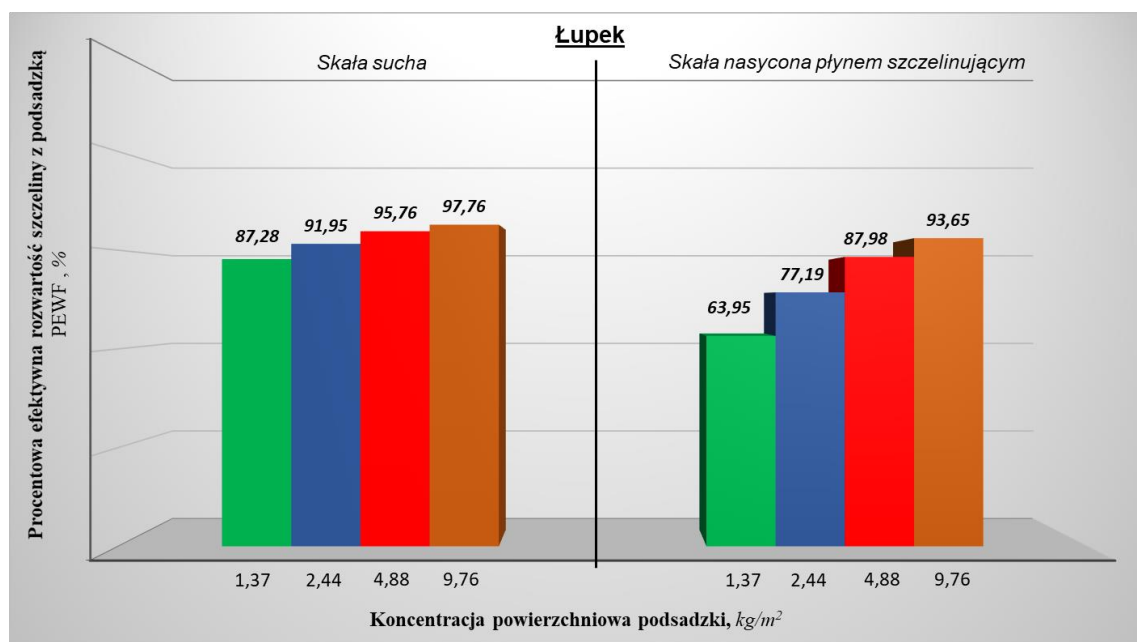
**Rys. 5.6** Maksymalna możliwa do uzyskania rozwartość szczeliny bez zjawiska embedmentu i wycisku dla różnych koncentracji powierzchniowych podsadzki ceramicznej ISP 20/40 w  $96 \text{ }^\circ\text{C}$ , przy  $65,5 \text{ MPa}$

Z kolei na poniższych wykresach (Rys. 5.7 i 5.8), podobnie jak w przypadku skały piaskowcowej przedstawiono efektywną rozwartość szczeliny oraz procentową jej rozwartość, dla suchej i nasyconej płynem szczelinującym 2 skały łupkowej.





**Rys. 5.7** Efektywna rozwartość szczeliny z podsadzką ceramiczną ISP 20/40 o różnej jej koncentracji powierzchniowej z uwzględnieniem zjawiska embedmentu wraz z wyciskiem materiału skalnego, dla łupka w 96 °C, przy 65,5 MPa



**Rys. 5.8** Procentowa efektywna rozwartość szczeliny z podsadzką ceramiczną ISP 20/40 o różnej jej koncentracji powierzchniowej z uwzględnieniem zjawiska embedmentu wraz z wyciskiem materiału skalnego, dla łupka w 96 °C, przy 65,5 MPa

W przypadku badanego łupka, największy procentowy spadek rozwartości szczeliny zanotowano dla skały nasyconej płynem szczelinującym, przy najmniejszej koncentracji powierzchniowej podsadzki 1,37  $kg/m^2$ . Efektywna rozwartość szczeliny zmniejszyła się z 0,810 mm do 0,518 mm. Odpowiadało to zmniejszeniu się maksymalnej

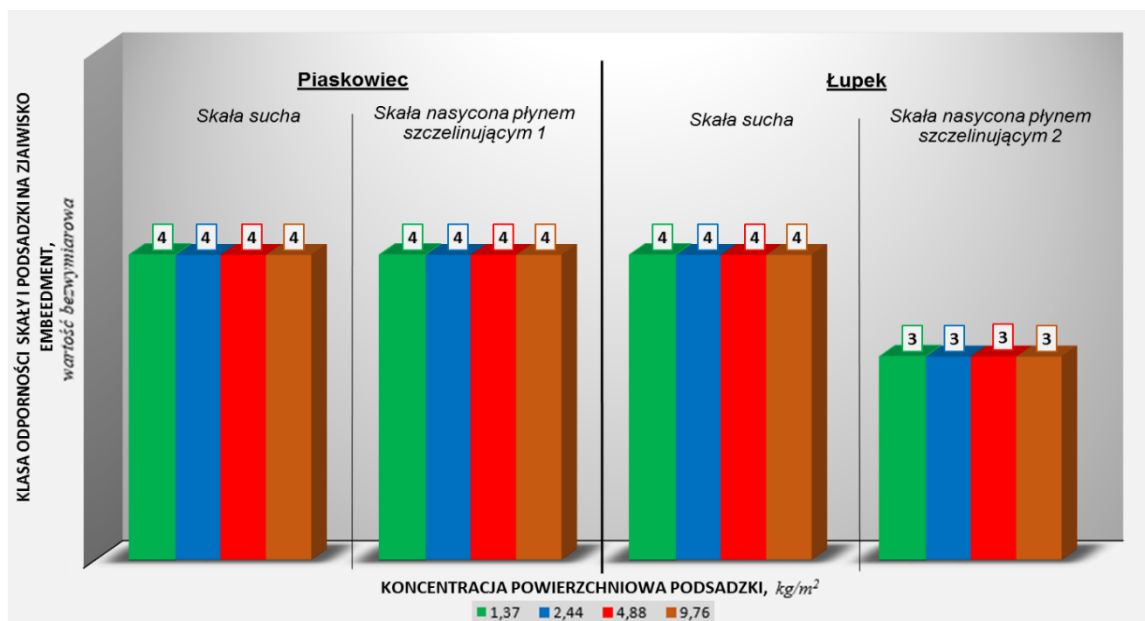
rozwartości o 36,05%. Z kolei dla suchej skały odnotowano zmniejszenie się rozwartości szczeliny o 12,72%, tj. do wartości 0,707 mm. Najmniejszy procentowy spadek rozwartości szczeliny, stanowiący 2,24% jej maksymalnej rozwartości otrzymano dla suchej skały, przy największej koncentracji powierzchniowej 9,76 kg/m<sup>2</sup>. Wartość efektywnej rozwartości szczeliny zmniejszyła w tym przypadku z 4,600 mm do 4,497 mm. Natomiast dla nasycenia skały płynem odnotowano zmniejszenie się efektywnej rozwartości szczeliny o 6,35%, tj. do wartości 4,308 mm.

Klasyfikacja efektywności podsadzenia szczeliny propanem dla wybranych skał i technologii stymulacji wydobycia węglowodorów

Wpływ zjawiska embedmentu na efektywność podsadzenia szczeliny w skale został zaprezentowany na wykresie (Rys. 5.9) według zaproponowanej klasyfikacji odporności skały i podsadzki na niekorzystne zjawisko (Tabela 5.3). Uwzględniała ona rodzaj skały oraz zadane warunki temperatury i ciśnienia ściskającego szczelinę, przy różnych koncentracjach powierzchniowych warstwy podsadzki. Do tego celu wykorzystano wartości procentowej efektywnej rozwartości szczeliny *PEWF* i procentowej efektywnej powierzchni ściany szczeliny *PEPS*, wyznaczone w testach 1, 2, 3, 4. W przypadku uzyskania dla układu skały i podsadzki dwóch różnych klas ich odporności na zjawisko embedmentu, do klasyfikacji przyjmowano niższą wartość.

**Tabela 5.3** Schemat klasyfikacji efektywności podsadzenia szczeliny, związanej z odpornością skały i podsadzki na zjawisko embedmentu

Zakres wartości dla <i>PEWF</i> i <i>PEPS</i> , %	Klasa odporności skały i podsadzki na zjawisko embedmentu
0 ÷ 20	1 – Bardzo niska
20 ÷ 40	2 – Niska
40 ÷ 60	3 – Średnia
60 ÷ 80	4 – Wysoka
80 ÷ 100	5 – Bardzo wysoka



**Rys. 5.9** Efektywność podsadzenia ścian szczeliny propantem ceramicznym ISP 20/40 o różnej jego koncentracji powierzchniowej z uwzględnieniem zjawiska embedmentu wraz z wyciskiem materiału skalnego, dla: piaskowca (w 127 °C, przy 86,5 MPa) oraz łupka (w 96 °C, przy 65,5 MPa)

Dla suchej skały piaskowcowej i podsadzki ceramicznej ISP 20/40 o rozmiarze ziaren rzędu  $0,850 \div 0,425$  mm (test 1), przy koncentracji powierzchniowej podsadzki  $4,88 \text{ kg/m}^2$ , wyznaczono  $PEWF = 95,65\%$  i  $PEPS = 67,65\%$ . Natomiast dla skały dodatkowo nasyconej płynem szczelinującym 1 (test 2),  $PEWF = 92,80\%$ , a  $PEPS = 68,30\%$ . Na podstawie tych danych i analiz, zgodnie z zaproponowaną klasyfikacją (Tab. 5.3), można wnioskować, że skała piaskowcowa charakteryzowała się wysoką odpornością na zjawisko embedmentu. Najmniejszą wartość  $PEWF = 77,83\%$ , wyznaczono dla skały nasyconej płynem szczelinującym. Miało to miejsce przy analizowanej szczelinie o koncentracji powierzchniowej warstwy podsadzki, równej  $1,37 \text{ kg/m}^2$ . Tym samym skałę zaklasyfikowano tutaj również jako posiadającą wysoką odporność na niekorzystne zjawisko. Natomiast najwyższą wartość  $PEWF = 97,73\%$  wyznaczono dla suchej skały, przy koncentracji podsadzki  $9,76 \text{ kg/m}^2$ . Ze względu na analizowaną dla niej wartość parametru  $PEPS = 67,65\%$ , zaklasyfikowano ją do wysokiej klasy odporności.

Podobnie sytuacja przedstawiała się dla suchej skały łupkowej i podsadzki w teście 3. Przy koncentracji powierzchniowej podsadzki  $4,88 \text{ kg/m}^2$ , wyznaczono  $PEWF = 95,76\%$  i  $PEPS = 70,61\%$ . Tym samym, według przyjętej klasyfikacji, skała charakteryzowała się także wysoką odpornością na zjawisko embedmentu. Natomiast dla skały łupkowej nasyconej płynem szczelinującym 2 w teście 4, wyznaczono

$PEWF = 87,98\%$  i  $PEPS = 53,94\%$ . Skałę zaklasyfikowano do średniej odporności na niekorzystne zjawisko. Najmniejsze wartości  $PEWF = 63,95\%$  i  $PEPS = 53,94\%$ , stwierdzono w przypadku skały nasyconej płynem szczelinującym. Miało to miejsce przy najmniejszej koncentracji powierzchniowej warstwy podsadzki, równej  $1,37 \text{ kg/m}^2$ . Tym samym skałę zaklasyfikowano tutaj do średniej odporności na niekorzystne zjawisko. Natomiast najwyższą wartość  $PEWF = 97,76\%$ , wyznaczono dla suchej skały, przy analizowanej koncentracji podsadzki  $9,76 \text{ kg/m}^2$  i  $PEPS = 70,61\%$ . Tym samym, skałę zaklasyfikowano do wysokiej klasy odporności.

## 6. Statystyczna ocena uzyskanych wyników

Oszacowanie statystycznej istotności uzyskanych wyników wykonano według poniżej opisanej metodyki i zestawiono w tabelach od 6.1 do 6.8.

Dla wyników pochodzących z bezpośrednich pomiarów uwzględniono dokładności urządzeń przy pomocy których dokonano pomiarów. Niepewność wartości uśrednionych oszacowano na podstawie wyliczonych odchyłeń standardowych od średniej.

Niepewność wyników uzyskanych na podstawie zastosowanych formuł oszacowano na podstawie różniczki zupełnej. W szczególności dla  $PUS_e$ :

$$\Delta PUS_e = \left| \frac{\partial PUS_e}{\partial Sw_e} \right| \Delta Sw_e + \left| \frac{\partial PUS_e}{\partial L_c} \right| \Delta L_c \quad (6.1)$$

gdzie:

$Sw_e$  – suma pomiarów wysokości wycisku materiału skalnego, *mm*

$L_c$  – całkowita długość odcinka pomiarowego, *mm*

$\Delta Sw_e$  – niepewność oszacowania  $Sw_e$ , *mm*

$\Delta L_c$  – niepewność oszacowania  $L_c$ , *mm*.

Niepewności dla  $PUS_w$  i  $PUS_{ew}$  zostały oszacowane w analogiczny sposób.

Wyniki oszacowania niepewności zamieszczono w tabelach obok wyników pomiarów i wartości wyliczonych.

W związku z tym, że w celu wykonania pomiarów dokonano wyboru obrazowanych obszarów z całej powierzchni czołowych rdzeni przeprowadzono:

- 1) Oszacowanie statystycznej istotności uzyskanych wyników. Przyjęto tutaj następujące założenia:
  - a) Wyniki wszystkich pomiarów podlegają rozkładowi normalnemu.
  - b) Dla próbki górnego i dolnego rdzenia wybrano po 5 obszarów i zarejestrowano wyniki pomiarów badanych parametrów.
  - c) Dla każdej próbki obliczono całkowite pole powierzchni obszarów oraz gęstość wgnieceń i wycisków na powierzchni czołowej rdzeni.
  - d) Dla wyliczonego pola powierzchni próbek i gęstości rozmieszczenia wgnieceń i wycisków na obszarach oszacowano maksymalną liczbę wgnieceń i wycisków dla każdej próbki na powierzchni rdzenia. Wielkości te uznano jako wielkości populacji wszystkich możliwych wyników pomiarów na danych próbkach.

- e) Rozwiązując równanie (6.2), (<https://www.naukowiec.org>, 2020) ze względu na  $e$ , oszacowano błąd „ $e$ ”, przy założeniu, że teoretyczna minimalna liczba wykonanych pomiarów będzie równa rzeczywistej liczbie wykonanych pomiarów.

$$N_{min} = \frac{N_P(U_{0,95}^2 \cdot f(1-f))}{N_P \cdot e^2 + U_{0,95}^2 \cdot f(1-f)} \quad (6.2)$$

gdzie:

$N_{min}$  – minimalna liczebność próby, *wartość bezwymiarowa*

$N_P$  – wielkość populacji, z której brana jest próba, *wartość bezwymiarowa*

$U_{0,95}$  – wartość krytyczna dla poziomu ufności 0,05, *wartość bezwymiarowa*

$f$  – wielkość frakcji, *wartość bezwymiarowa*

$e$  – wyliczony błąd maksymalny, w %

- 2) Ocenę mającą na celu sprawdzenie, czy wyniki pomiarów wykonanych na różnych obszarach powierzchni czołowej rdzenia należą do tej samej (pod względem statystycznym) populacji.

Pomiary parametrów chropowatości i embedmentu z uwzględnieniem wycisku materiału szklanego zostały wykonane w wybranych obszarach powierzchni czołowych rdzeni. Uzyskane wyniki zostały uśrednione w obrębie wszystkich obszarów powierzchni rdzeni. W związku z tym dokonano oceny statystycznej mającej na celu sprawdzenie, czy wyniki uzyskane z różnych obszarów należą do tej samej populacji. W tym celu wykonano testy równości średnich. Dla każdego opomiarowanego obszaru wyliczono średnią charakteryzującą ten obszar oraz średnią z pomiarów należących do pozostałych obszarów. Procedurę tę przeprowadzono dla pomiarów głębokości i szerokości wgnieceń oraz wysokości i szerokości wycisków.

Przyjęto założenie, że badane parametry mają rozkład normalny, są niezależne oraz liczebności prób są małe.

Dla każdego z wymienionych mierzonych parametrów zdefiniowano hipotezę zerową  $H_0$  w następujący sposób:

$$H_0: \overline{x_{i,1}} = \overline{x_{i,2}} \quad (6.3)$$

oraz hipotezę alternatywną:

$$H_1: \overline{x_{i,1}} \neq \overline{x_{i,2}} \quad (6.4)$$

gdzie:

$\bar{x}_{l,1}$  – średnia dla mierzonego parametru dla obszaru  $i$ ,  $mm$

$\bar{x}_{l,2}$  – średnia dla mierzonego parametru dla pozostałych obszarów (z wyłączeniem obszaru  $i$ ),  $mm$ .

Statystyki testowe  $t$  obliczono według wzoru:

$$t = \frac{\bar{x}_{l,1} - \bar{x}_{l,2}}{\frac{n_1 \cdot s_1 + n_2 \cdot s_2}{n_1 + n_2 - 2} \left( \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)} \quad (6.5)$$

gdzie:

$n_1$  i  $n_2$  – liczebności prób, *wartość bezwymiarowa*

$s_1$  i  $s_2$  – odchylenia standardowe dla prób,  $mm$ .

Wyznaczono obszary krytyczne według zależności:

$$|t| > t_\alpha \quad (6.6)$$

gdzie:

$t_\alpha$  – jest zmienną o rozkładzie t-Studenta o  $n_1 + n_2 - 2$  stopniach swobody i  $\alpha = 0,05$ .

W przypadku gdy zmienna  $t$  znalazła się w obszarze krytycznym odrzucono hipotezę zerową  $H_0$  na rzecz hipotezy alternatywnej  $H_1$ .



**Tabela 6.1** Wyniki testu równości średnich dla pomiarów chropowatości w zakresie głębokości wgłębień i wysokości wzniesień dla suchej skały piaskowcowej, w teście 1

Założone parametry dla statystyki	Wgłębienia		Wzniesienia	
	Rdzeń górny	Rdzeń dolny	Rdzeń górny	Rdzeń dolny
Pole powierzchni czołowej rdzenia, $mm^2$	506,530	506,690	506,530	506,690
Liczba wgłębień i wzniesień, wartość bezwymiarowa	134	127	114	117
Całkowite pole powierzchni obszarów, $mm^2$	5,298	5,297	5,298	5,297
Gęstość rozmieszczenia wgłębień i wzniesień w obszarze, $1/mm^2$	25,291	23,978	21,516	22,090
Maksymalna liczba wgnieceń oraz wycisków na powierzchni czołowej ( $N_p$ ), wartość bezwymiarowa	12809	12153	10897	11196
Wartość krytyczna dla poziomu ufności 0,05 ( $U_{0,95}$ ), wartość bezwymiarowa	1,96	1,96	1,96	1,96
Wielkość frakcji ( $f$ ), wartość bezwymiarowa	0,5	0,5	0,5	0,5
Minimalna liczba pomiarów ( $N_{min}$ ), wartość bezwymiarowa	134	127	114	117
<b>Błąd oszacowania (<math>e</math>), %</b>	<b>8,43</b>	<b>8,65</b>	<b>9,15</b>	<b>9,00</b>

**Tabela 6.2** Wyniki testu równości średnich dla pomiarów chropowatości w zakresie głębokości wgłębień i wysokości wzniesień dla suchej skały piaskowcowej, w teście 2

Założone parametry dla statystyki	Wgłębienia		Wzniesienia	
	Rdzeń górny	Rdzeń dolny	Rdzeń górny	Rdzeń dolny
Pole powierzchni czołowej rdzenia, $mm^2$	506,530	506,490	506,530	506,490
Liczba wgłębień i wzniesień, wartość bezwymiarowa	125	133	104	112
Całkowite pole powierzchni obszarów, $mm^2$	5,245	5,298	5,245	5,298
Gęstość rozmieszczenia wgłębień i wzniesień w obszarze, $1/mm^2$	23,835	25,103	19,830	21,139
Maksymalna liczba wgnieceń oraz wycisków na powierzchni czołowej ( $N_p$ ), wartość bezwymiarowa	12071	12713	10043	10706
Wartość krytyczna dla poziomu ufności 0,05 ( $U_{0,95}$ ), wartość bezwymiarowa	1,96	1,96	1,96	1,96
Wielkość frakcji ( $f$ ), wartość bezwymiarowa	0,5	0,5	0,5	0,5
Minimalna liczba pomiarów ( $N_{min}$ ), wartość bezwymiarowa	125	133	104	112
<b>Błąd oszacowania (<math>e</math>), %</b>	<b>8,73</b>	<b>8,45</b>	<b>9,55</b>	<b>9,20</b>

**Tabela 6.3** Wyniki testu równości średnich dla pomiarów embedmentu w zakresie głębokości wgniecia i wysokości wycisków oraz szerokości wgniecia i wycisków dla suchej skały piaskowcowej, w teście 1

Założone parametry dla statystyki	Wgniecia		Wyciski	
	Rdzeń górny	Rdzeń dolny	Rdzeń górny	Rdzeń dolny
Pole powierzchni czołowej rdzenia, $mm^2$	507,368	506,849	507,368	506,849
Liczba wgniecia oraz wycisków, wartość bezwymiarowa	60	59	119	114
Całkowite pole powierzchni obszarów, $mm^2$	44,938	44,975	44,938	44,975
Gęstość rozmieszczenia wgniecia i wycisków w obszarze, $1/mm^2$	1,335	1,312	2,648	2,535
Maksymalna liczba wgniecia oraz wycisków na powierzchni czołowej ( $N_p$ ), wartość bezwymiarowa	677	665	1343	1285
Wartość krytyczna dla poziomu ufności 0,05 ( $U_{0,95}$ ), wartość bezwymiarowa	1,96	1,96	1,96	1,96
Wielkość frakcji ( $f$ ), wartość bezwymiarowa	0,5	0,5	0,5	0,5
Minimalna liczba pomiarów ( $N_{min}$ ), wartość bezwymiarowa	60	59	119	114
<b>Błąd oszacowania (<math>e</math>), %</b>	<b>12,10</b>	<b>12,20</b>	<b>8,57</b>	<b>8,75</b>

**Tabela 6.4** Wyniki testu równości średnich dla pomiarów embedmentu w zakresie głębokości wgniecia i wysokości wycisków oraz szerokości wgniecia i wycisków dla skały piaskowcowej nasyconej płynem szczelinującym, w teście 2

Założone parametry dla statystyki	Wgniecia		Wyciski	
	Rdzeń górny	Rdzeń dolny	Rdzeń górny	Rdzeń dolny
Pole powierzchni czołowej rdzenia, $mm^2$	507,169	507,089	507,169	507,089
Liczba wgniecia oraz wycisków, wartość bezwymiarowa	46	50	87	98
Całkowite pole powierzchni obszarów, $mm^2$	41,915	40,992	41,915	40,992
Gęstość rozmieszczenia wgniecia i wycisków w obszarze, $1/mm^2$	1,098	1,220	2,076	2,391
Maksymalna liczba wgniecia oraz wycisków na powierzchni czołowej ( $N_p$ ), wartość bezwymiarowa	557	619	1053	1213
Wartość krytyczna dla poziomu ufności 0,05 ( $U_{0,95}$ ), wartość bezwymiarowa	1,96	1,96	1,96	1,96
Wielkość frakcji ( $f$ ), wartość bezwymiarowa	0,5	0,5	0,5	0,5
Minimalna liczba pomiarów ( $N_{min}$ ), wartość bezwymiarowa	46	50	87	98
<b>Błąd oszacowania (<math>e</math>), %</b>	<b>13,80</b>	<b>13,30</b>	<b>10,05</b>	<b>9,50</b>

**Tabela 6.5** Wyniki testu równości średnich dla pomiarów chropowatości w zakresie głębokości wgłębień i wysokości wzniesień dla suchej skały łupkowej, w teście 3

Założone parametry dla statystyki	Wgłębienia		Wzniesienia	
	Rdzeń górny	Rdzeń dolny	Rdzeń górny	Rdzeń dolny
Pole powierzchni czołowej rdzenia, $mm^2$	505,892	505,512	505,892	505,512
Liczba wgłębień i wzniesień, wartość bezwymiarowa	267	266	294	256
Całkowite pole powierzchni obszarów, $mm^2$	5,354	5,441	5,354	5,441
Gęstość rozmieszczenia wgłębień i wzniesień w obszarze, $1/mm^2$	49,865	48,892	54,908	47,054
Maksymalna liczba wgnieceń oraz wycisków na powierzchni czołowej ( $N_p$ ), wartość bezwymiarowa	25234	24703	27786	23774
Wartość krytyczna dla poziomu ufności 0,05 ( $U_{0,95}$ ), wartość bezwymiarowa	1,96	1,96	1,96	1,96
Wielkość frakcji ( $f$ ), wartość bezwymiarowa	0,5	0,5	0,5	0,5
Minimalna liczba pomiarów ( $N_{min}$ ), wartość bezwymiarowa	267	266	294	256
<b>Błąd oszacowania (<math>e</math>), %</b>	<b>5,97</b>	<b>5,98</b>	<b>5,69</b>	<b>6,09</b>

**Tabela 6.6** Wyniki testu równości średnich dla pomiarów chropowatości w zakresie głębokości wgłębień i wysokości wzniesień dla suchej skały łupkowej, w teście 4

Założone parametry dla statystyki	Wgłębienia		Wzniesienia	
	Rdzeń górny	Rdzeń dolny	Rdzeń górny	Rdzeń dolny
Pole powierzchni czołowej rdzenia, $mm^2$	503,822	503,186	503,822	503,186
Liczba wgłębień i wzniesień, wartość bezwymiarowa	248	267	245	270
Całkowite pole powierzchni obszarów, $mm^2$	5,508	5,459	5,508	5,459
Gęstość rozmieszczenia wgłębień i wzniesień w obszarze, $1/mm^2$	45,028	48,910	44,484	49,460
Maksymalna liczba wgnieceń oraz wycisków na powierzchni czołowej ( $N_p$ ), wartość bezwymiarowa	22679	24615	22405	24892
Wartość krytyczna dla poziomu ufności 0,05 ( $U_{0,95}$ ), wartość bezwymiarowa	1,96	1,96	1,96	1,96
Wielkość frakcji ( $f$ ), wartość bezwymiarowa	0,5	0,5	0,5	0,5
Minimalna liczba pomiarów ( $N_{min}$ ), wartość bezwymiarowa	248	267	245	270
<b>Błąd oszacowania (<math>e</math>), %</b>	<b>6,19</b>	<b>5,97</b>	<b>6,23</b>	<b>5,93</b>

**Tabela 6.7** Wyniki testu równości średnich dla pomiarów embedmentu w zakresie głębokości wgniecen i wysokości wycisków oraz szerokości wgniecen i wycisków dla suchej skały łupkowej, w teście 3

Założone parametry dla statystyki	Wgniecenia		Wyciski	
	Rdzeń górny	Rdzeń dolny	Rdzeń górny	Rdzeń dolny
Pole powierzchni czołowej rdzenia, $mm^2$	506,411	505,813	506,411	505,813
Liczba wgniecen oraz wycisków, wartość bezwymiarowa	51	59	100	117
Całkowite pole powierzchni obszarów, $mm^2$	43,750	42,328	43,750	42,328
Gęstość rozmieszczenia wgniecen i wycisków w obszarze, $1/mm^2$	1,166	1,394	2,286	2,764
Maksymalna liczba wgniecen oraz wycisków na powierzchni czołowej ( $N_p$ ), wartość bezwymiarowa	590	705	1158	1398
Wartość krytyczna dla poziomu ufności 0,05 ( $U_{0,95}$ ), wartość bezwymiarowa	1,96	1,96	1,96	1,96
Wielkość frakcji ( $f$ ), wartość bezwymiarowa	0,5	0,5	0,5	0,5
Minimalna liczba pomiarów ( $N_{min}$ ), wartość bezwymiarowa	51	59	100	117
<b>Błąd oszacowania (<math>e</math>), %</b>	<b>13,10</b>	<b>12,20</b>	<b>9,35</b>	<b>8,66</b>

**Tabela 6.8** Wyniki testu równości średnich dla pomiarów embedmentu w zakresie głębokości wgniecen i wysokości wycisków oraz szerokości wgniecen i wycisków dla skały łupkowej nasyconej płynem szczelinującym, w teście 4

Założone parametry dla statystyki	Wgniecenia		Wyciski	
	Rdzeń górny	Rdzeń dolny	Rdzeń górny	Rdzeń dolny
Pole powierzchni czołowej rdzenia, $mm^2$	509,446	509,086	509,446	509,086
Liczba wgniecen oraz wycisków, wartość bezwymiarowa	50	65	92	130
Całkowite pole powierzchni obszarów, $mm^2$	38,292	41,942	38,292	41,942
Gęstość rozmieszczenia wgniecen i wycisków w obszarze, $1/mm^2$	1,306	1,550	2,403	3,100
Maksymalna liczba wgniecen oraz wycisków na powierzchni czołowej ( $N_p$ ), wartość bezwymiarowa	665	789	1224	1578
Wartość krytyczna dla poziomu ufności 0,05 ( $U_{0,95}$ ), wartość bezwymiarowa	1,96	1,96	1,96	1,96
Wielkość frakcji ( $f$ ), wartość bezwymiarowa	0,5	0,5	0,5	0,5
Minimalna liczba pomiarów ( $N_{min}$ ), wartość bezwymiarowa	50	65	92	130
<b>Błąd oszacowania (<math>e</math>), %</b>	<b>13,30</b>	<b>11,60</b>	<b>9,80</b>	<b>8,25</b>

Wyliczony błąd oszacowania parametrów chropowatości dla skały piaskowcowej mieścił się w przedziale  $8,43\% \div 9,55\%$ , a dla skały łupkowej w przedziale  $5,69\% \div 6,23\%$ . Z kolei parametry zjawiska embedmentu z uwzględnieniem zjawiska wycisku materiału skalnego dla piaskowca posiadały błąd w przedziale  $8,57\% \div 13,80\%$ , natomiast dla łupka w przedziale  $8,25\% \div 13,30\%$ .

#### Oceny wyników pomiarów pobranych z różnych obszarów powierzchni czołowej rdzenia pod kątem przynależności do tej samej populacji statystycznej

W celu wykonania oceny wyników pomiarów przeprowadzono test równości średnich dla: głębokości wgłębień i wysokości wzniesień (dla wyznaczenia chropowatości), pomiarów głębokości wgnieceń i wysokości wycisków (dla wyznaczenia embedmentu z uwzględnieniem zjawiska wycisku materiału skalnego) oraz innych parametrów określających procentowe uszkodzenie powierzchni skały.

Ze względu na bardzo dużą liczbę zestawień i ocen, odstąpiono od zaprezentowania wszystkich szczegółowych rezultatów analiz.

Dla każdego badanego rdzenia wykonano łącznie 20 testów chropowatości i 40 testów embedmentu z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego (dla powierzchni czołowej obu rdzeni). W zdecydowanej większości przypadków test równości średnich potwierdził, że pomiary wykonane w różnych obszarach rdzeni nie odbiegają od siebie w znaczeniu zastosowanej miary statystycznej.

W pozostałych przypadkach test równości średnich nie potwierdził zgodności statystycznej wartości pomiarów wykonanych w różnych obszarach rdzeni:

- dla rdzenia górnego i dolnego (test 1): 15% przypadków chropowatości i 7,5% przypadków embedmentu z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego,
- dla rdzenia górnego i dolnego (test 2): 15% przypadków chropowatości i 5% przypadków embedmentu z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego,
- dla rdzenia górnego i dolnego (test 3): 5% przypadków chropowatości i 25% przypadków embedmentu z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego,
- dla rdzenia górnego i dolnego (test 4): 15% przypadków chropowatości i 10% przypadków embedmentu z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego.

Zaprezentowane oszacowanie niepewności uzyskanych wyników potwierdza poprawność wykonania eksperymentu i przyjętych metod obliczeniowych. Rezultaty oszacowania statystycznej istotności uzyskanych wyników wskazują na poprawny dobór obszarów obejmujących pomiary w stosunku do powierzchni czołowych rdzeni.

## 7. Dyskusja wyników

Jak wynika z wielu istniejących opracowań przedstawionych w rozdziale 2.3.3, na wielkość zjawiska embedmentu mają wpływ między innymi takie czynniki jak: rozmiar ziaren podsadzki, krągłość i kulistość ziaren, niejednorodność skały złożowej, nasycenie skały płynem, możliwość kruszenia się ziaren podsadzki i skały w miejscu ich kontaktu ze sobą oraz nierównomierne rozmieszczenie ziaren podsadzki na powierzchni skały.

W założonych w pracy warunkach ciśnienia, temperatury i nasycenia płynami, obie badane skały cechowały się zbliżonymi parametrami sprężystości. Dla piaskowca moduł Young'a wynosił 20,6 GPa, a współczynnik Poisson'a 0,29. Parametry dla skały łupkowej to odpowiednio  $E_d = 18,1$  GPa i  $\nu_d = 0,31$ . Obie skały miały także zbliżone wartości współczynnika kruchości (dla piaskowca 31,3%, dla łupka 28,1%). Stosunkowo niskie wartości dynamicznego modułu Young'a i wysokiego współczynnika Poisson'a wskazują na znaczną plastyczność skały, co w przypadku łupka wynika z wysokiej zawartości minerałów ilastych (>50%) (Dziedzic i Łukaszewski, 2015). Wartość modułu Young'a dla piaskowca jest wyższa niż dla łupka, jednak i tak znacznie niższa niż podawana w literaturze dla skał piaskowcowych (np. 63 GPa wg. Bały w 1990 roku). Jest to spowodowane obecnością solanki w przestrzeni porowej, gdyż w niniejszej pracy przyjęto stan nasycenia w przypadku skały piaskowcowej, w celu przybliżenia warunków eksperymentu do warunków złożowych. Uzyskane wartości parametrów sprężystości dla piaskowca są zbliżone do podawanych przez Moskę (2017) dla piaskowców czerwonego spągowca: 17-19 GPa.

Na podstawie wykonanego w rozdziale 2.3.3 przeglądu doświadczeń światowych i krajowych widać, iż poszczególni badacze stosowali różne metody badań i analizy rozpatrywanego niekorzystnego zjawiska embedmentu. Badania polegały zwykle na odwzorowaniu zjawiska w warunkach laboratoryjnych poprzez umieszczenie pomiędzy dwoma próbkami skalnymi podsadzki lub pomiędzy stalową a skalną próbką, a następnie poddawano je działaniu naprężeń ściskających w różnych warunkach temperatur, przez różny okres czasu. Skała była sucha lub dodatkowo nasycana w różnych płynach przez zadany okres czasu. Opracowane zostały także matematyczne modele omawianego zjawiska, przedstawiające jego wpływ na spadek rozwartości szczeliny oraz jej przewodności.

Na efektywność zabiegu stymulacyjnego oraz wielkość prezentowanego niekorzystnego zjawiska embedmentu wpływa wiele czynników, stąd korelacja między badaniami jest znacznie utrudniona.

Zaproponowana w pracy doktorskiej metodyka wykonania badań i analizy wyników umożliwia ocenę wpływu wgniatania ziaren materiału podsadzkowego w skałę wraz z wyciskiem materiału skalnego na efektywność podsadzenia wytworzonej szczeliny. W dostępnej literaturze brak jest dokładnych analiz uwzględniających wycisk materiału skalnego przy rozpatrywaniu zjawiska embedmentu. Wycisk ten przejawia się przede wszystkim spadkiem efektywnej rozwartości szczeliny. Zostały tu wykonane również badania związane z określeniem wpływu płynu szczelinującego na parametry prezentowanego zjawiska.

Laboratoryjne badania skały piaskowcowej nasyconej w roztworze 2% KCl wykonane przez Volka i in. (1981), w temperaturze otoczenia wykazały że spadek pierwotnej rozwartości szczeliny jest rzędu od 0,43 mm do 1,33 mm. Z kolei badania wykonane dla krajowego piaskowca typu „tight gas” o zawartości kwarcu 38% i ilów 27%, dodatkowe nasycenie jego w płynie szczelinującym wykazało spadek rozwartości szczeliny o 0,397 mm (Masłowski i in. 2016). Uszkodzenie powierzchni takiej skały piaskowcowej spowodowane przez wgniatające się w nią ziarna podsadzki jest rzędu 29,1÷32,6%. Wartości te były zbliżone lub znacznie wyższe od wartości uzyskanych dla badanej w pracy skały piaskowcowej.

Zaprezentowane w niniejszej pracy wyniki badań dla suchej skały piaskowcowej o dużej zawartości kwarcu (powyżej 70%), wykazały, że po wciskaniu się w nią podsadzki o dużej średnicy ziaren charakteryzuje się ona słabo widocznymi wgnieceniami na powierzchni. Wgniecenia są widoczne w szczególności w miejscach większego nagromadzenia spoiwa. Ziarna kwarcu w skale (o mniejszej twardości) kontaktujące się z ziarnami podsadzki ceramicznej (o większej twardości) są wciskane w głąb skały i częściowo rozkruszone. Powodują one także spękania sąsiadujących ziaren kwarcu. Może to przyczyniać się do zmniejszenia przestrzeni porowej dostępnej dla przepływu węglowodorów ze skały do wytworzonej szczeliny z propanem. Średnia szerokość  $W_{e\_sr}$  pojedynczego wgniecenia powstałego na powierzchni takiej skały jest równa 0,322 mm. Przyczynia się to do powstania 32,35% uszkodzenia pierwotnej powierzchni skały  $PUS_{e\_sr}$ , przy uwzględnieniu wszystkich ziaren podsadzających ściany szczeliny. Tym samym procentowa efektywna powierzchnia  $PEPS$  skały ma wysoką wartość, równą 67,65%. Z kolei powstały wycisk materiału skalnego powoduje zmiany w 35,48% jej powierzchni.



Średnia głębokość  $H_{ew_{sr}}$  wgniecenia, z uwzględnieniem wysokości wycisku materiału skalnego odpowiada wartości 0,051 mm. Rozpatrując szczelinę składającą się z dwóch ścian, ziarna podsadzki wciskają się w powierzchnię skały na całkowitą głębokość  $H_{ew_c} = 0,101$  mm, uwzględniającą wycisk materiału skalnego. Przyczynia się to do nieznacznego zmniejszenia się maksymalnej efektywnej rozwartości szczeliny z wartości  $W_{fm} = 2,320$  mm do  $W_{f.ef} = 2,219$  mm (tj. spadek o 4,35%). Tym samym procentowa efektywna rozwartość szczeliny *PEWF* dla suchej skały piaskowcowej jest bardzo wysoka i wynosi 95,65%.

Dodatkowe nasycenie skały piaskowcowej w zaproponowanym płynie szczelinującym nie wpływa znacząco na wzrost wielkości wgnieceń. Są one najczęściej widoczne w obrębie spoiwa. Natomiast w miejscach o koncentracji ziaren kwarcu powierzchnia skały jest wygładzona. Szerokość wgniecenia powstałego na powierzchni takiej skały nieznacznie wzrasta w stosunku do suchej skały, tj. do wartości 0,345 mm. Przyczynia się to do uszkodzenia pierwotnej powierzchni skały, równemu 31,70%. Tym samym jest ono porównywalne do wybranych w pracy suchych skał. Procentowa efektywna powierzchnia skały jest wysoka i wynosi 68,30%. Nieznacznie wzrasta zmiana powierzchni skały spowodowana wyciskiem materiału skalnego, do wartości 40,10%. Średnia wartość paarmetru  $H_{ew_{sr}}$  wynosi 0,083 mm i jest większa niż w przypadku suchych skał. Dla takiego rodzaju skały, w szczelinie ziarna podsadzki wciskają się w jej powierzchnię z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego na całkowitą głębokość, równą 0,167 mm. Przyczynia się to także do nieznacznego zmniejszenia się parametru  $W_{fm}$  do wartości  $W_{f.ef} = 2,153$  mm (tj. spadek o 7,20%). Tym samym procentowa efektywna rozwartość szczeliny jest nadal bardzo wysoka i wynosi 92,80%.

Dla skał łupkowych istnieje w literaturze znacznie większa liczba publikacji, niż dla piaskowców.. Związane jest to z większym zainteresowaniem naukowców tego typu skałami, w szczególności ze względu na większą ich podatność na zjawisko embedmentu. Rickman i in. (2008), stwierdzili że skała o podwyższonej zawartości minerałów ilastych i zwiększonej plastyczności (wskaźnik kruchości BRIT < 30%) charakteryzuje się znacznie zmniejszoną podatnością na hydrauliczne szczelinowanie. Wymaga ona użycia specjalnej technologii stymulacji dla lepszego wypełnienia szczeliny materiałem podsadzkowym. Korelację mineralogii skał łupkowych, właściwości geomechanicznych, składu płynu szczelinującego oraz zjawiska wgniatania ziaren podsadzki w skałę ze spadkiem przewodności szczeliny w różnych złożach niekonwencjonalnych wykonali Alramahi i Sundberg (2012). Jednak ze względu na bardzo dużą różnorodność warunków

złożowych i wiele innych czynników redukujących przewodność szczeliny nie można ich badań uznać za uniwersalne dla wszystkich formacji złożowych. Przy ciśnieniu 69 MPa uzyskali oni dla skały, o zawartości minerałów ilastych równej 10%, zmniejszenie się pierwotnej rozwarłości szczeliny o 0,1 mm. Natomiast dla skały o zawartości minerałów ilastych rzędu 52%, rozwarłość szczeliny zmniejszyła się o 0,9 mm. Były to wartości znacznie wyższe niż w przypadku wyników uzyskanych dla badanej w niniejszej pracy skały łupkowej. Jak należy się spodziewać, większa zawartość w skale płynu prowadzi do zwiększenia plastyczności, a tym samym zwiększa się głębokość wciskania się ziaren podsadzki w skałę (Mueller i Amro, 2015). Z kolei Terracina i in. (2010) zwrócili uwagę, że podsadzenie szczeliny propanem pokrytym żywicą ogranicza zjawisko embedmentu. Przy podsadzeniu szczeliny piaskiem pokrytym żywicą (o rozmiarze ziaren  $0,850 \div 0,425$  mm) w skale łupkowej, pochodzącej z obszaru Bakken Shale, ziarna takie wgniatają się na głębokość 0,044 mm. Tym samym szczelina zaciska się o wartość 0,088 mm. Z kolei piasek bez pokrycia żywicą, w tych samych warunkach wciska się w skałę na głębokość 0,216 mm. Autorzy ci zauważyli także, że dla skały łupkowej z obszaru Haynesville Shale piasek pokryty żywicą (o średnicy ziaren  $0,425 \div 0,012$  mm) spadek rozwarłości szczeliny jest równy 0,210 mm. Natomiast użycie podsadzki ceramicznej nie pokrytej żywicą, powoduje wzrost głębokości zaciskania się szczeliny o wartość 0,403 mm.

Z kolei badania wykonane dla krajowego sylurskiego łupka (o zawartości minerałów ilastych 48%), nasyconego płynem szczelinującym, wykazują spadek rozwarłości szczeliny o wartość 0,416 mm lub 0,512 mm, w temperaturze otoczenia (Masłowski, 2015; Masłowski i Biały, 2016). Ze względu na zastosowanie ziaren podsadzki o bardzo małym rozmiarze ( $0,425 \div 0,212$  mm) i użytej niskiej koncentracji powierzchniowej podsadzki ( $0,98 \text{ kg/m}^2$ ) dochodzi do zaciśnięcia się szczeliny rzędu  $75,3 \div 99,6\%$  jej pierwotnej rozwarłości, przy wartościach naprężeń rzędu  $41,4 \div 68,9$  MPa. Masłowski i in. (2018b, 2019) zanotowali, że wzrost temperatury do  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ , przy zwiększonej średnicy ziaren podsadzki, wpływa na ograniczenie wielkości wgniatania się podsadzki w skałę. W takim przypadku wartość spadku rozwarłości szczeliny obniża się do  $0,089 \div 0,103$  mm. Tym samym, przy zastosowanej koncentracji powierzchniowej rzędu  $2,44 \text{ kg/m}^2$ , pierwotna rozwarłość szczeliny zmniejsza się o 5,9%. W badaniach tych, autorzy nie uwzględnili wysokości wycisku materiału skalnego. Duże uszkodzenie powierzchni skały ( $38,7 \div 41,2\%$ ) spowodowane przez wgniatające się w nią ziarna podsadzki zanotowano dla sylurskiego łupka nasyconego w płynie szczelinującym.

Zaprezentowane w niniejszej pracy wyniki badań dla suchej skały łupkowej o dużej zawartości minerałów ilastych (54%) pokazują uszkodzenie jej powierzchni poprzez utworzenie się spękań i łusek z wyciśnięcia i oderwania materiału skalnego. Liczne spękania, powodujące kruszenie skały, mogą przyczyniać się tutaj do lepszego przepływu węglowodorów ze skały do szczeliny wypełnionej podsadzką. W zadanych warunkach temperatury i ciśnienia ściskającego, niższych niż w przypadku piaskowca, odnotowuje się dla łupka nieznaczne zmniejszenie się parametru  $W_{e, sr}$  do wartości 0,302 mm. Tym samym przyczynia się to do nieznacznego zmniejszenia się uszkodzenia pierwotnej powierzchni skały przez wszystkie ziarna podsadzki do wartości 29,39%. Procentowa efektywna powierzchnia ściany szczeliny nieznacznie zwiększa się do wartości 70,61% i nadal jest wysoka. Wycisk materiału skalnego powoduje tutaj zmianę 37,58% powierzchni skały. Odnotowuje się tutaj także porównywalne wartości parametrów  $H_{ew, sr} = 0,050$  mm i  $H_{ew, c} = 0,103$  mm, w stosunku do suchej skały piaskowcowej. Przyczynia się to do zmniejszenia się rozwartości szczeliny z  $W_{fm} = 2,430$  mm do  $W_{f, ef} = 2,327$  mm (tj. spadek o 4,24%). Tym samym dla takiej skały wartość parametru  $PEWF$  jest także bardzo wysoka i wynosi 95,76%.

Z kolei, przy nasyceniu skały łupkowej płynem szczelinującym, na jej powierzchni widać największą ilość wyraźnych wgnieceń w stosunku do pozostałych analizowanych skał. Związane jest to z uplastycznieniem skały. W obszarze wgniecenia widać fragmenty spękań i odspojenia w postaci łusek. Skała takiego typu łatwo pęka w płaszczyznach zgodnych z warstwowaniem. Wartość parametru  $W_{e, sr}$ , w stosunku do pozostałych skał, znacząco wzrasta do wartości 0,406 mm. Przyczynia się to do zwiększenia uszkodzenia pierwotnej powierzchni skały przez wszystkie ziarna wypełniające szczelinę do wartości 46,06%. Tym samym wartość procentowej efektywnej powierzchni ścian takiej szczeliny znacząco spada do wartości 53,94% i stanowi średnią jej wielkość. Natomiast wycisk materiału skalnego powoduje zmiany pierwotnej powierzchni skały w 40,45%. Odnotowuje się tutaj wzrosty parametrów  $H_{ew, sr}$  do 0,143 mm i  $H_{ew, c}$  do 0,292 mm. Przyczynia się on do zmniejszenia wartości parametru  $W_{fm}$  do  $W_{f, ef} = 2,138$  mm (tj. spadek o 12,02%). Tym samym procentowa efektywna rozwartość szczeliny jest również bardzo wysoka i wynosi 87,98%.

Dla lepszej oceny efektywności podsadzenia szczeliny przez propant, dodatkowo zaproponowano także schemat klasyfikacji odporności skały na niekorzystne zjawisko embedmentu (tabela 5.3 w rozdziale 5). Dedykowany jest on dla czterech wytypowanych koncentracji powierzchniowych podsadzki, tj. 1,37; 2,4; 4,88; 9,76 kg/m<sup>2</sup>. Do tego celu

wykorzystano dwa parametry: procentową efektywną rozwartość szczeliny (*PEWF*) i procentową efektywną powierzchnię ścian szczeliny (*PEPS*). Na podstawie tych danych stwierdzono, że analizowana skała łupkowa w postaci suchej posiada zbliżoną efektywność podsadzenia szczeliny jak w przypadku skały piaskowcowej, przy zastosowaniu zaproponowanej podobnej technologii stymulacji. Odporność ich na prezentowane zjawisko jest wysokiej klasy 4. Z kolei różnice uwidoczniły się w przypadku nasycenia płynem szczelinującym skały o podwyższonej zawartości minerałów ilastych podatnych na pęcznienie i uplastycznienie jej właściwości. Łupek o ogniwie ilowców bitumicznych z Jantaru charakteryzuje się od permskiego piaskowca czerwonego spągowca niższą o jeden stopień klasą odporności na zjawisko embedmentu, tj. klasa 3, przy wytypowanych czterech koncentracjach powierzchniowych podsadzki.

Wyniki badań wskazują też, że skała o podwyższonej zawartości minerałów ilastych (powyżej 50%) charakteryzuje się zwiększoną plastycznością. Skała tego rodzaju może posiadać zmniejszoną podatność na pękanie podczas jej hydraulicznego szczelinowania oraz zwiększoną podatność na zjawisko embedmentu, po zakończeniu zabiegu.

Należy także zanaczyć, że ważnym aspektem w pracy było zaproponowanie statystycznej oceny uzyskanych wyników chropowatości pierwotnej powierzchni skały oraz parametrów charakteryzujących zjawisko embedmentu. W dostępnej literaturze nie odnotowano szczegółowo wykonanej tego typu analizy statystycznej. Parametry chropowatości posiadały błąd oszacowania w przedziale od 5,69% do 9,55%. Z kolei parametry zjawiska wgniatania ziaren podsadzki w skałę i wycisku materiału skalnego były w przedziale od 8,25% do 13,8%. Test równości średnich wykazał, że pomiary wykonane w różnych obszarach rdzeni nie odbiegają znacząco od siebie w znaczeniu zastosowanej miary statystycznej. Jedynie w nielicznych przypadkach odnotowano brak zgodności statycznej. Tym samym potwierdzało to prawidłowe wytypowanie obszarów do reprezentowania całej powierzchni ścian szczeliny.

## 8. Podsumowanie i wnioski

W pracy zaproponowano ocenę wpływu wgniatania ziaren materiału podsadzkowego w skałę złożową na efektywność podsadzenia szczeliny w zabiegach stymulacyjnych. Opracowaną metodykę badawczą potwierdzono w eksperymentach na próbkach skalnych dla dwóch różnych krajowych złóż niekonwencjonalnych. Warunki eksperymentów dla każdej ze skał przyjęto odpowiednio do rzeczywistych warunków złożowych, panujących na średnich głębokościach ich zalegania.

Badania eksperymentalne zjawiska embedmentu oraz analizy i interpretacje uzyskanych wyników pomiarów przeprowadzono zgodnie z opracowaną samodzielnie metodyką. Pozwoliła ona na określenie parametrów obrazujących efektywność podsadzenia szczeliny, wynikającą ze spadku rozwartości szczeliny oraz uszkodzenia skały przez ziarna podsadzki w okolicach ścian szczeliny. Wykonano także analizę zmian morfologii powierzchni skały.

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz sformułowano następujące wnioski:

1. Parametry sprężystości badanych skał w symulowanych warunkach złożowych są następujące: dla łupka moduł Young'a wynosił 18,1 GPa, a współczynnik Poisson'a 0,31; dla piaskowca odpowiednio  $E_d = 20,6$  GPa i  $\nu_d = 0,29$ . Wartości te wskazują na wysoką plastyczność skał.
2. Zastosowana metodyka symulacji zjawiska embedmentu w warunkach laboratoryjnych pozwoliła na wyznaczenie istotnych parametrów zarówno dla skały suchej jak i nasyconej płynem szczelinującym. Opracowana metoda analizy zjawiska embedmentu z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego jest autorska i stanowi znaczny wkład w rozwój metodyki badań tego zjawiska.
3. Rozwartości wytworzonej szczeliny w wyniku zabiegów stymulacyjnych uzależniona jest od warunków złożowych, technologii hydraulicznego szczelinowania złoża oraz koncentracji powierzchniowej podsadzki.
4. Badania eksperymentalne i zaprezentowana analiza ich wyników pozwoliły na określenie oraz ocenę wpływu użytej technologii do zabiegu hydraulicznego szczelinowania złóż na efektywność podsadzenia szczeliny propantem. Było to związane z właściwym doбором płynu zabiegowego, rodzaju i granulacji ziaren podsadzki oraz jej koncentracji.

5. Wykonanie teoretycznej analizy wpływu zjawiska embedmentu na efektywność podsadzenia wytworzonej szczeliny w skale, pozwoliło na dodatkową ocenę efektywności podsadzenia jej dla różnych koncentracji powierzchniowych podsadzki.
6. Określone parametry charakteryzujące wgniecenia ziaren podsadzki w ściany szczeliny i wyciski materiału skalnego pozwoliły na wyznaczenie efektywnej rozwartości szczeliny oraz efektywnej powierzchni kontaktu ścian z warstwą podsadzki. Uwzględniono tutaj warunki złożowe, rodzaj i koncentrację powierzchniową podsadzki oraz płyn szczelinujący. Uzyskane wyniki mogą znaleźć zastosowanie przy realizacji zabiegów hydraulicznego szczelinowania.
7. Wyznaczona procentowa efektywna powierzchnia ściany szczeliny wypełnionej podsadzką oraz procentowa efektywna rozwartość szczeliny z podsadzką mogą być pomocne przy weryfikacji rzeczywistej przewodności szczeliny. Parametry te pozwalają ocenić rzeczywisty potencjał szczeliny w transferze węglowodorów ze złoża do odwiertu.
8. Według opracowanej klasyfikacji skała piaskowcowa (zarówno sucha jak i nasycona) posiada wysoką odporność (klasę 4) na zjawisko embedmentu, z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego. Skała łupkowa nasycona płynem szczelinującym wykazuje średnią odporności (klasę 3) na embedment.
9. Analiza morfologii powierzchni czołowej rdzeni pozwoliła na interpretację zmian zachodzących w skałach w obrębie wgniecenia.
10. Sucha skała piaskowcowa po wciskaniu w nią ziaren podsadzki wykazuje słabo widoczne wgnieceniami, bardziej zauważalne są one zwłaszcza w miejscach większego nagromadzenia spoiwa. Pojawiają się także spękania niektórych ziaren kwarcu. Nasylenie skały piaskowcowej płynem szczelinującym nie wpływa znacząco na wzrost wielkości wgnieceń.
11. W przypadku suchej skały łupkowej uszkodzenie powierzchni skały polega na utworzeniu spękań i łusek z wyciśnięcia i oderwania materiału skalnego. Skała łupkowa nasycona płynem szczelinującym ulega uplastycznieniu, co powoduje powstanie silnych wgnieceń i odspojień w postaci łusek. Skała łatwo pęka w płaszczyznach zgodnych z warstwowaniem.
12. Określenie parametrów zjawiska embedmentu jest niezwykle przydatne w projektowaniu i analizie zabiegów hydraulicznego szczelinowania dla danych

warunków złożowych i technologii stymulacji, z wykorzystaniem zaproponowanej metodyki badawczej.

13. Zastosowanie uzyskanych w pracy wyników w praktyce może mieć wpływ na poprawę efektywności zabiegów hydraulicznego szczelinowania formacji, charakteryzujących się podwyższonym stopniem plastyczności.

Podsumowując, przyjęte w pracy tezy zostały zweryfikowane i potwierdzone eksperymentalnie, a cel pracy został w pełni zrealizowany.



## Literatura

- Akrad O., Miskimins J., Prasad M. **2011**. *The Effects of Fracturing Fluids Rock Mechanical Properties and Proppant Embedment*. SPE 146658, s. 1-12. DOI: 10.2118/146658-MS
- Allen Thomas O., Roberts Allan P. **1993**. *Production Operations: Well Completions, Workover and Stimulation*. Tom 2, wyd. 4.
- Alramahi B., Sundberg M.I. **2012**. *Proppant Embedment and Conductivity of Hydraulic Fractures in Shales*. ARMA 12-291.
- Argawal, R. G., Carter, R. D., and Pollock, C.B. **1979**. *Evaluation of Performance of Low Permeability Gas Wells Stimulated by Massive Hydraulic Fracturing*. JPT, s. 362-372; Trans. AIME; 267, (March 1979).
- Bała M. **1990**. *Klasyfikacja skał osadowych na podstawie ich modułów sprężystości i wyznaczonych z obrazów falowych*. Geofizyka.
- Bała M. **2017**. *Charakterystyka parametrów sprężystych określonych na podstawie pomiarów geofizyki otworowej i modeli teoretycznych w wybranych formacjach w otworach basenu bałtyckiego i wierconych na szelfie*. Nafta-Gaz 2017, nr 8, s. 558–570, DOI: 10.18668/NG.2017.08.03
- Bandara K.M.A.S., Ranjith P.G., Rathnaweera T.D. **2019**. *Improved understanding of proppant embedment behavior under reservoir conditions: a review study*. Powder Technol 352, s. 170–192
- Buniak A. **2005**. *Paleogeografia basenu schyłku górnego czerwonego spągowca*. Arch. PGNiG S.A o. Północ, Piła.
- Buniak A., Kwolek K., Kiersnowski H., Kuberska M. **2008**. *Perspektywy odkrycia złóż gazu ziemnego (typu tight gas) w piaskowcach eolicznych w basenie górnego czerwonego spągowca*. Geopetrol, Sekcja geologia i geofizyka, s. 61-66.
- Chen D., Ye Z., Pan Z., Zhou Y., Zhang J. **2017**. *A permeability model for the hydraulic fracture filled with proppant packs under combined effect of compaction and embedment*. J. Pet. Sci. Eng. 149, 2017, s. 428–435.
- Chen M., Zhang S., Liu M., Ma X., Zou Y., Zhou T., Li N., Li S. **2018**. *Calculation method of proppant embedment depth in hydraulic fracturing*. PETROLEUM EXPLORATION AND DEVELOPMENT, t. 45, wyd. 1, February 2018, s. 159-166.
- Cheng A.L., Huang W.L. **2004**. *Selective adsorption of hydrocarbon gases on clays and organic matter*. Organic Geochemistry, 35 (4), s. 13–423.
- Chong K.K., Grieser W.V., Passman A., Tamayo H.C., Modeland N., Burke B.E. **2010**. *A Completions Guide Book to Shale-Play Development: A Review of Successful Approaches Towards Shale-Play Stimulation in the Last Two Decades*. CSUG/SPE, 133874, s. 1–14.
- Cipolla C.L., Warpinski N.R., Mayerhofer M.J., Lolon E., Vincent M.C. **2008**. *The Relationship Between Fracture Complexity, Reservoir Properties, and Fracture Treatment Design*. Society of Petroleum Engineers. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 21-24 September, Denver, Colorado, USA. SPE 115769-MS, s. 1-25. DOI: 10.2118/115769-MS
- Cooke Jr. CE. **1973**. *Conductivity of Fracture Proppants in Multiple Layers*. Journal of Petroleum Technology, tom. 25, nr. 09, s. 1101-1107.
- Cui A., Glover K., Wust R. **2014**. *Elastic and plastic mechanical properties of liquids-rich unconventional shales and their implications for hydraulic fracturing and proppant embedment: a case study of the Nordegg member in Alberta*. Canada, 48th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, American Rock Mechanics Association.

- Cumella S.P., Shanley K.W., Camp W.K. **2008**. *Understanding, exploring, and developing tight-gas sands*. Introduction. [W:] Cumella S.P., Shanley K.W., Camp W.K. (eds.): *2005 Vail Hedberg Conference*, AAPG Hedberg Series, vol. 3, s. 1–4.
- Czupski M. **2012**. *Zastosowanie mikroemulsji jako składnika poprawiającego sprawność płynów szczelinujących i odbiór cieczy po wykonanym zabiegu*. *Nafta-Gaz*, s. 171-172.
- Czupski M., Kasza P., Wilk K. **2013**. *Płyny do szczelinowania złóż niekonwencjonalnych*. *Nafta-Gaz* 2013, nr 1, s. 42-50.
- Dyrka I., Kiersnowski H., Wójcicki A. **2020**. *Możliwość występowania w Polsce złóż typu BCGS (Basin Centered Gas System)*. Państwowy Instytut Geologiczny, Państwowy Instytut Badawczy, Państwowa Służba Geologiczna. Źródło: <https://www.pgi.gov.pl/psg-1/psg-2/informacja-i-szkolenia/wiadomosci-surowcowe/10872-mozliwosc-wystepowania-w-polsce-zloz-typu-bcgs-basin-centered-gas-system.html> (dostęp: 15.06.2020)
- Dziedzic A., Łukaszewski P. **2015**. *Metodyczne uwarunkowania badań geomechanicznych skał pobranych z dużych głębokości w trójosiowym stanie naprężenia*. *Nafta-Gaz*, nr 1, s. 3-10.
- Economides M.J., Nolte, K.G. **1989**. *Reservoir Stimulation*. Second edition. Houston.
- Fjar E., Holt R., Horsrud P., Raanen A., Risnes R. **2008**. *Petroleum related rock mechanics, second edition*. Elsevier Science.
- Fuss T., Shi J., Ma J., Herndon D.C., Stephens W.T. **2014**. *Environmental Responsibility of Current Proppant Solutions*. Society of Petroleum Engineers. SPE Western North American and Rocky Mountain Joint Meeting, 17-18 April, Denver, Colorado. SPE-169571-MS, s. 1-11. DOI: 10.2118/169571-MS
- Ghanizadeh A., Clarkson C.r., Deglint H., Vahedian A., Aquino S., Wood J.M. **2016**. *Unpropped/Propped Fracture Permeability and Proppant Embedment Evaluation: A Rigorous Core-Analysis/Imaging Methodology*. Paper presented at the SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference, San Antonio, Texas, USA, August 2016. URTEC-2459818-MS, s. 1-29. <https://doi.org/10.15530/URTEC-2016-2459818>
- Ghassemi A., Suarez-Rivera R. **2012a**. *Sustaining Fracture Area and Conductivity of Gas Shale Reservoirs for Enhancing Long-Term Production and Recovery*. Projekt nr 08122-48. RPSEA, 15.V.2012.
- Ghassemi A., Suarez-Rivera R. **2012b**. *Sustaining Fracture Area and Conductivity of Gas Shale Reservoirs for Enhancing Long-Term Production and Recovery. Appendix 5 – Proppant Embedment Standard Testing Procedure*. Projekt nr 08122-48. RPSEA, 15.V.2012.
- Gibowicz S.J. **1984**. *The mechanism of large mining tremors in Poland*. [In:] Guy N.C. & Wainwright E.M. (ed.) — *Proceedings of the 1st International Congress on Rockburst and Seismicity in Mines*. Johannesburg, 1982: s. 17–28. SAIMM: Johannesburg.
- Gidley J.L., Holditch S.A., Nierode D.A., Veatch R.V. **1989**. *Recent Advances in Hydraulic Fracturing*. Society of Petroleum Engineers.
- Grieser B., Bray J. **2007**. *Identification of production potential in unconventional reservoirs*. Society of Petroleum Engineers. SPE 106623, s. 1-6. DOI:10.2118/106623-MS.
- Grundmann S.R., Lord D.L. **1983**. *Foam stimulation*. Society of Petroleum Engineers. SPE-9754-PA, t. 35, wyd. 03, s. 1-7. DOI: 10.2118/9754-PA
- Guo J., Liu Y. **2012**. *Modeling of Proppant Embedment: Elastic Deformation and Creep Deformation*. SPE 157449, s. 1-8.
- Guo J., Wang J., Liu Y., Chen Z., Zhu H. **2017**. *Analytical analysis of fracture conductivity for sparse distribution of proppant packs*. *J. Geophys. Eng.* 14, 2017, s. 599–610.

- Holditch S.A. **2006**. *Tight Gas Sands*. Society of Petroleum Engineers. SPE-103356-JPT, t. 58, s. 1-7. DOI: 10.2118/103356-JPT
- Huang, J., R. Safari, O. Perez, E.F. Fragachan. **2019**. *Reservoir Depletion-Induced Proppant Embedment and Dynamic Fracture Closure*. SPE 195135-MS.
- Huitt J.L., McGlothlin, B. B., Jr. **1958**. *The Propping of Fractures in Formations Susceptible to Propping-sand Embedment*. Drill. and Prod. API (1958), s. 115-123.
- <https://pl.wikipedia.org>, **2018**. Źródło:  
[https://pl.wikipedia.org/wiki/Stopie%C5%84\\_geotermiczny](https://pl.wikipedia.org/wiki/Stopie%C5%84_geotermiczny) (dostęp: 01.02.2018)
- <https://pgnig.pl>, **2020**. Źródło:  
<https://pgnig.pl/documents/29748/961630/KGZ+Kaleje+i+OG+Zaniemy%C5%9Bl.pdf/5934c41a-4cfc-43d0-85f1-2924ade506b8> (dostęp: 15.06.2020)
- <https://www.naukowiec.org>, **2020**. Źródło:  
[https://www.naukowiec.org/wzory/metodologia/minimalna-liczebno%C5%9B-proby\\_902.htm](https://www.naukowiec.org/wzory/metodologia/minimalna-liczebno%C5%9B-proby_902.htm) (dostęp: 15.06.2020)
- <https://www.pgi.gov.pl> **2020**. Państwowy Instytut Geologiczny, Państwowy Instytut Badawczy, Państwowa Służba Geologiczna. Źródło:  
<https://www.pgi.gov.pl/psg-1/psg-2/informacja-i-szkolenia/wiadomosci-surowcowe/10870-echy-charakterystyczne-systemow-bcgs-basin-centered-gas-system.html> (dostęp: 15.06.2020)
- Jansen T.A., Zhu D., Hill A.D. **2015**: *The effect of rock mechanical properties on fracture conductivity for shale formations*. SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, Society of Petroleum Engineers.
- Jarosiński M. **2005a**. *Współczesny reżim tektoniczny w Polsce na podstawie analizy testów szczelinowania hydraulicznego ścian otworów wiertniczych*. Przegląd Geologiczny, t. 53, nr 10/1, 2005, s. 863-872.
- Jarosiński M. **2005b**. *Ongoing tectonic reactivation of the Outer Carpathians and its impact on the foreland: results of borehole breakout measurements in Poland*. Tectonophysics, t. 410, 1-4, s. 189-216. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.12.040>
- Jennings Jr.A., Darden W., Wenzel R., Shrut R., Foster J. **1997**. *Massive hydraulic fracturing in the Eastern United States*. Society of Petroleum Engineers. DOI: 10.2118/6866-MS.
- Karczewska A., Żurawski E. **1998**. *Złoża obszaru morskiego. W: Ocena perspektyw poszukiwawczych złóż ropy naftowej i gazu ziemnego w utworach kambriu syneklizy bałtyckiej na podstawie analizy basenów sedymentacyjnych starszego paleozoiku*. Opracowanie archiwalne. NAG Warszawa.
- Karnkowski P. **1993**. *Złoża gazu ziemnego i ropy naftowej w Polsce*. Niż Polski. Tom 1, s. 45-46.
- Kasza P. **2011a**. *Zabiegi stymulacji wydobywania w niekonwencjonalnych złożach węglowodorów*. Nafta-Gaz, nr 10, s. 697-701.
- Kasza P. **2011b**. *Zabiegi hydraulicznego szczelinowania w formacjach łupkowych*. Nafta-Gaz 2011, nr 12, s. 874-880.
- Kasza P. **2013**. *Efektywne szczelinowanie łupków w Polsce*. Nafta-Gaz, nr 11, s. 807-813
- Kasza P. **2019**. *Zabiegi hydraulicznego szczelinowania złóż niekonwencjonalnych i metody ich analizy*. Prace Naukowe Instytutu Nafty i Gazu - Państwowego Instytutu Badawczego, PN 226.2019, s. 1-147. DOI: 10.18668/PN2019.226
- Kelland A. M. **2014**. *Production chemicals for the Oil and Gas industry*. Second Edition, Taylor & Francis Group. ISBN 9781439873793
- Kiersnowski H. **1997**. *Depositional development of the Polish Upper Rotliegend Basin and evolution of its sediment source areas*. Geol. Quart., 41, 4: s. 433-456.

- Kiersnowski H., Buniak A., Kuberska M., Srokowska-Okońska A. **2010**. *Występowanie gazu ziemnego zamkniętego w piaskowcach czerwonego spągowca Polski*. Przegląd Geologiczny, vol. 58, nr 4, s. 335-346.
- King G. E. **2010**. *Thirty years of gas shale fracturing: What we have learned*. Society of Petroleum Engineers. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 16-22 September, Florence, Italy. SPE 133456-MS. Doi.org/10.2118/133456-MS
- Krzemiński L. **2005**. *Proweniencja materiału okruszowego piaskowców karbońskich z wartyjskich basenów przedpola w południowo-zachodniej Polsce i na Morawach*. Biuletyn PIB, 417: s. 27-108.
- Kumar V., Sondergeld C.H., Rai C.S. **2012**. Nano to macro mechanical characterization of shale, Proceedings - SPE Annual Technical Conference and Exhibition, s. 3421–3443.
- Lacy L. L., Rickards A. R., Bilden D.M. **1998**. *Fracture Width and Embedment Testing in Soft Reservoir Sandstone*. SPE Drilling & Completion 13(1): 25-29. SPE-36421-PA. <http://dx.doi.org/10.2118/36421-PA>
- Law B.E. **2002**. *Basin-Centered Gas Systems*. AAPG Bulletin, t. 86, nr. 11, s. 1891–1919.
- Legarth B. **2003**. *Erschließung sedimentärer Speichergesteine für eine geothermische Stromerzeugung*. PhD-thesis, Technical University Berlin, D83, Faculty VI: Civil Engineering and Applied Geosciences. Published as scientific technical report STR03/09. GeoForschungsZentrum Potsdam, Germany.
- Legarth B., Raab, S., Huenges E. **2005**. *Mechanical Interactions between proppants and rock and their effect on hydraulic fracture performance*. DGMK-Tagungsbericht 2005-1, Fachbereich Aufsuchung und Gewinnung, 28.-29. April 2005, Celle, Deutschland, s. 275-288.
- Li K., Gao Y., Lyu Y., Wang M. **2015**. *New Mathematical Models for Calculating Proppant Embedment and Fracture Conductivity*. SPE J. 20 (03): s. 496–507. SPE-155954-PA. <https://doi.org/10.2118/155954-PA>
- Li X., Feng Z., Han G., Elsworth D., Marone C., Saffer D., Cheon D.S. **2017**. *Permeability evolution of propped artificial fractures in Green River shale*. Rock Mech. Rock. Eng. 50, 2017, s. 1473–1485.
- Liang F., Sayed M., Al-Muntasheri G.A., Chang F.F., Li L. **2016**. *A comprehensive review on proppant technologies*. Petroleum, 03.2016, t. 2, wyd. 1, s. 26–39. DOI:10.1016/J.PETLM.2015.11.001
- Liu Y. **2017**. *Long term conductivity of narrow fractures filled with a proppant monolayer in shale gas reservoirs*. J. Eng. Res. 2017, 5.
- Liu Y., Wang J., Guo J., Zhu H., Zeng J. **2018**. *Numerical Modeling of the Conductivity of the Particle Monolayer with Reduced Size*. Wydanie specjalne: Micro- and Nanoflow in Porous Media. Hindawi, Geofluids. Tom 2018, s. 1-10. Article ID 7073091. <https://doi.org/10.1155/2018/7073091>
- Makos M. **2014**. *Activities of PGNiG in exploration of unconventional hydrocarbon resources in Poland*. Science for Industry: Necessity is the mother of invention: Third Networking Event dedicated to the Polish experience in the field of shale gas exploration, 25–27.06.2014. ING PAN, Warszawa. Źródło: <https://docplayer.pl/26295865-Activities-of-pgnig-in-exploration-of-unconventional-hydrocarbon-resources-in-poland.html> (dostęp: 07.01.2021)
- Masłowski M. **2014**. *Materiały podszkawkowe do zabiegów hydraulicznego szczelinowania złóż niekonwencjonalnych*. Nafta-Gaz, s. 75-86.

- Masłowski M. **2015**. *Badania zjawiska wciskania ziaren materiału podsadzkowego w ściany szczeliny po zabiegu hydraulicznego szczelinowania złóż niekonwencjonalnych*. Nafta-Gaz, nr 7, s. 461-471.
- Masłowski M. **2016**. *Badania przewodności warstwy materiału podsadzkowego dla gazu (azotu) po zabiegu hydraulicznego szczelinowania złóż niekonwencjonalnych*. Nafta-Gaz, nr 3, s. 177-185. DOI: 10.18668/NG.2016.03.04
- Masłowski M. **2019**. *Laboratoryjne obrazowanie wielkości wgniatania ziaren podsadzki w ścianę szczeliny*. Nafta-Gaz, nr 8, s. 458-464. DOI: 10.18668/NG.2019.08.02.
- Masłowski M. **2020**. *Laboratoryjna symulacja wgniatania ziaren podsadzki w formację złożową typu tight gas*. Nafta-Gaz, nr 4, s. 261-269. DOI: 10.18668/NG.2020.04.05.
- Masłowski M., Biały E. **2016**. *Badania zjawiska embedment w zabiegach stymulacyjnych*. Nafta-Gaz, nr 12, s. 1101-1106. DOI: 10.18668/NG.2016.12.13
- Masłowski M., Czupski M. **2014**. *Podstawowe właściwości materiałów podsadzkowych stosowanych do zabiegów hydraulicznego szczelinowania złóż węglowodorów*. Przegląd Górniczy, nr 12, s. 44-50.
- Masłowski M., Labus M. **2021**. *Preliminary Studies on the Proppant Embedment in Baltic Basin Shale Rock*. Rock Mechanics and Rock Engineering (2021). Wyd. 3, March 2021. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02407-0>
- Masłowski M., Kasza P., Czupski M. **2016**. *Badania podatności skały złożowej typu tight gas na zjawisko embedment ograniczające efektywność zabiegu hydraulicznego szczelinowania*. Nafta-Gaz, nr 10, s. 822-832. DOI: 10.18668/NG.2016.10.07
- Masłowski M., Kasza P., Czupski M., Wilk K. **2018a**. *Sposób wyznaczania zmniejszenia rozwartości podsadzonej szczeliny*. Patent nr 228609, Urząd Patentowy RP, 10.04.2018.
- Masłowski M., Kasza P., Wilk K. **2018b**. *Studies on the effect of the proppant embedment phenomenon on the effective packed fracture in shale rock*. Acta Geodynamica et Geomaterialia, Tom 15, nr 2 (190), 105-115. DOI: 10.13168/AGG.2018.0012.
- Masłowski M., Kasza P., Czupski M., Wilk K., Moska R. **2019**. *Studies of Fracture Damage Caused by the Proppant Embedment Phenomenon in Shale Rock*. Applied Sciences-Basel, Tom 9, nr 11, s. 1-14. DOI: 10.3390/app9112190
- Masłowski M., Kasza P., Czupski M., Wilk K., Moska R. **2021**. *Sposób wyznaczania wysokości wycisku materiału skalnego dla szczeliny*. Patent nr 237823, Urząd Patentowy RP, 05.02.2021.
- Meckel L.D., Thomasson M.R. **2008**. *Pervasive tight-gas sandstone reservoir: an overview*. [W:] Cumella S.P., Stanley K.W., Camp W.K. (eds.): *Understanding, exploring, and developing tight-gas sands*. AAPG Hedberg Series, t. 3, s. 13–27.
- Mighani S., Taneja S., Sondergeld C.H., Rai C.S. **2015**. *Nanoindentation creep measurements on shale*. 49th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium 2015, s. 604–610.
- Modliński Z., Szymański B. **1997**. *The Ordovician lithostratigraphy of the Peribaltic Depression (NE Poland)*. Geological Quarterly, 41(3), s. 273-288
- Modliński Z., Szymański B. **2008**. *Litostratygrafia ordowiku w obniżeniu podlaskim i w podłożu niecki płocko-warszawskiej (wschodnia Polska)*. Biul. Państw. Inst. Geol., 430, s. 79–12.
- Modliński Z., Szymański B., Teller L. **2006**. *Litostratygrafia syluru polskiej części obniżenia perybaltyckiego – część lądowa i morska (N Polska)*. Przegląd Geologiczny, t. 54, s. 787-796.
- Morales H., Tek T. **2012**. *Sustaining Fracture Area and Conductivity of Gas Shale Reservoirs for Enhancing Long-Term Production and Recovery*. RPSEA Unconventional Gas



- Conference 2012: Geology, the Environment, Hydraulic Fracturing, Canonsburg, 17-18.IV.2012.
- Moska R., Masłowski M. **2019**. *Próby wyznaczenia parametrów geomechanicznych i anizotropii Thomsena w węglu kamiennym z obszaru Górnośląskiego Zagłębia Węglowego*. Nafta-Gaz, nr 11, s. 700–707, DOI: 10.18668/NG.2019.11.05
- Much M. G., Penny G. S. **1987**. *Long-Term Performance of Proppants Under Simulated Reservoir Conditions*. Paper SPE-16415-MS, presented at Low Permeability Reservoirs Symposium. Denver, Colorado. 18-19 May. <http://dx.doi.org/10.2118/16415-MS>
- Mueller M., Amro M. **2015**. *Indentation Hardness for Improved Proppant Embedment Prediction in Shale Formation*. SPE 174227-MS, 2015, s.1-14. DOI: 10.2118/174227-MS
- Naik G.C. **2003**. *Tight gas reservoirs – An unconventional natural energy source for the future*. The association of petroleum Geologists of India. S. 9 1-32. Źródło: [http://pinedaleonline.com/socioeconomic/pdfs/tight\\_gas.pdf](http://pinedaleonline.com/socioeconomic/pdfs/tight_gas.pdf) (dostęp: 20.02.219)
- Paktinat J., Pinkhouse J.A., Johanson N., Williams C., Lash G.G., Penny G.S., Goff D.A. **2006**. *Case study optimizing hydraulic fracturing performance in northeastern United States fractured shale formation*. SPE 104306, s. 1-11. DOI: 10.2118/104306-MS.
- Palish T.T., Vincent M.C., Handren P.J. **2008**. *Slickwater fracturing – food for thought*. Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, USA, September 2008. SPE 115766-MS. DOI: 10.2118/115766-MS
- Papiernik B., Górecki W., Pasternacki A. **2010**. *Wstępne wyniki modelowań przestrzennych (3D) parametrów petrofizycznych skał podczas poszukiwań stref występowania gazu zamkniętego w polskim basenie czerwonego spągowca*. Przegląd Geologiczny, t. 58, nr 4, s. 352-364.
- Parker M.A., Ramurthy K., Sanchez P. **2012**. *New Proppant for Hydraulic Fracturing Improves Well Performance and Decreases Environmental Impact of Hydraulic Fracturing Operations*. Society of Petroleum Engineers. SPE Eastern Regional Meeting, 3-5 October, Lexington, Kentucky, USA. SPE-161344-MS, s. 1-110. DOI: 10.2118/161344-MS
- Penny, G.S. **1987**. *An evaluation of the effects of environmental conditions and fracturing fluids upon long term conductivity of proppants*. SPE16900.
- Perez Pena P.A. **2015**. *The Effect of Rock Properties on Fracture Conductivity in the Marcellus Shale*.
- Pimenov A.A., Kanevskaya R.D. **2017**. *Mathematical Modeling of Proppant Embedment and Its Effect on Conductivity of Hydraulic Fracture*. Paper presented at the SPE Russian Petroleum Technology Conference, Moscow, Russia, October 2017. SPE-187934-MS, <https://doi.org/10.2118/187934-MS>
- Pokorski J. **1998**. *Perspektywy występowania złóż gazu ziemnego w utworach czerwonego spągowca. [W:] Analiza basenów sedymentacyjnych Niżu Polskiego*. Pr. Państw. Inst. Geol., 165, s. 293–298.
- Popov M.A., Nuccio V.F., Dyman T.S., Gognat T.A., Johnson R.C., Schmoker J.W., Wilson M.S., Bartberger Ch. **2000**. *Basin-Centered Gas Systems of the US*. US Department of the Interior, Geological Survey, Open File Report, OF 01-135, s. 1–299.
- Poprawa P. **2006a**. *Neoproterozoiczny rozpad superkontynentu Rodinii/Pannotii — zapis w rozwoju basenów osadowych na zachodnim skłonie Baltiki*. Pr. Państw. Inst. Geol., 186: s. 165–188.
- Poprawa P. **2006b**. *Rozwój kaledońskiej strefy kolizji wzdłuż zachodniej krawędzi Baltiki oraz jej relacje do basenu przedpola*. Pr. Państw. Inst. Geol., 186: s. 189–214.

- Poprawa P. **2010a**. *Potencjał występowania złóż gazu ziemnego w łupkach dolnego paleozoiku w basenie bałtyckim i lubelsko-podlaskim*. Przegląd Geologiczny, t. 58, nr 3, s. 226-249.
- Poprawa P. **2010b**. *System węglowodorowy z gazem ziemnym w łupkach – północnoamerykańskie doświadczenia i europejskie perspektywy*. Przegląd geologiczny, 2010b, t. 58, nr 3, s. 216-225.
- Poprawa P. **2010c**. *Analiza osadów ilasto-mułowcowych w Polsce pod kątem możliwości występowania w nich niekonwencjonalnych nagromadzeń gazu ziemnego*. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, 439, s. 159-172
- Poprawa P. **2018a**. *System węglowodorowy z gazem ziemnym w centralnych strefach basenu – zastosowanie jako koncepcji poszukiwawczej w karbońskim basenie górnośląskim*. Nafta-Gaz, nr 12, s. 871-883. DOI: 10.18668/NG.2018.12.01
- Poprawa P. **2018b**. *Możliwość występowania złóż gazu zamkniętego w głębokich strefach basenu górnośląskiego*. Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna GEOPETROL 2018, Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy, Kraków, materiały konferencyjne, s. 187–192.
- Poprawa P., Kiersnowski H. **2008**. *Perspektywy poszukiwań gazu ziemnego w skałach ilastych (shale gas) oraz gazu ziemnego zamkniętego (tight gas) w Polsce*. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, t. 429, s. 145-152.
- Poprawa P., Kiersnowski H. **2010a**. *Zwięzłe formacje zbiornikowe (tight reservoir) dla gazu w Polsce*. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, t. 439, s. 173-180.
- Poprawa P., Kiersnowski H. **2010b**. *Potencjał dla poszukiwań gazu ziemnego zamkniętego w utworach czerwonego spągowca Polski na tle poszukiwań w Europejskim basenie permskim*. Referat wygłoszony na konferencji: Niekonwencjonalne złoża gazu ziemnego w Polsce — gaz w łupkach (shale gas) i gaz zamknięty (tight gas). Warszawa.
- Poprawa P., Paczeńska J. **2002**. *Rozwój ryftu w późnym neoproterozoiku-wczesnym paleozoiku na lubelsko-podlaskim skłonie kratonu wschodnioeuropejskiego — analiza subsydencji i zapisu facjalnego*. Przegląd Geologiczny, 50(1): s. 49–63.
- Poszytek A. **2007**. *Sedimentary processes diversifying of reservoir properties of the Upper Rotliegend deposits in the Fore-Sudetic Monocline*. [In:] EAGE 69th Conference & Exhibition, London, UK, 11–14.06.2007.
- Raport PIG-PIB **2012**. *Ocena zasobów wydobywanych gazu ziemnego i ropy naftowej w formacjach łupkowych dolnego paleozoiku w Polsce (basen bałtycko-podlasko-lubelski)*. Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Raport pierwszy, s. 1-29.
- Reinicke A., Legarth B., Zimmermann G., Huenges E., Dresenn G. **2006**. *Hydraulic Fracturing and Formation Damage in a Sedimentary Geothermal Reservoir*. ENGINE – Enhanced Geothermal Innovative Network for Europe Workshop 3, "Stimulation of reservoir and microseismicity" Kartause Ittingen, Zürich, 29.VI – 1.VII, 2006, Switzerland.
- Reinicke A., Rybacki E., Stanchits S., Huenges E., Dresen G. **2010**. *Hydraulic fracturing stimulation techniques and formation damage mechanisms – Implications from laboratory testing of tight sandstone – proppant systems*. Chemie der Erde 70, s. 107-117. DOI: 10.1016/j.chemer.2010.05.016
- Rickman R., Muller M., Petre E., Grieser B., Kundert D., Halliburton **2008**. *A Practical Use of Shale Petrophysics for Stimulation Design Optimization: All Shale Plays Are Not Clones of the Barnett Shale*. Paper Society of Petroleum Engineers presented at Annual Technical Conference and Exhibition, 21-24 September, Denver, Colorado USA. SPE 115258. DOI: 10.2118/115258-MS



- Rietveld H.M. **1969**. *A profile refinement method for nuclear and magnetic structures*. Journal of Applied Crystallography 2 (2): s. 65–71.
- Sato K., Ichikawa M. **1998**. *Post-Frac analysis indicating multiple fractures created in a volcanic formation*. SPE paper 39513. Proceedings SPE India oil and gas conference and exhibition, New Delhi.
- Seedhouse J., Burley S., Wakefield M. **1996**. *Porosity evolution in aeolian Rotliegend sandstones from the Polish Central Trough*. British Gas.
- Shaoul J.R., Ross M.J., Spitzer W.J., Wheaton S.R., Mayland P.J., Singh A.P. **2007**. *Massive hydraulic fracturing unlocks deep tight gas reserves in India*. Society of Petroleum Engineers. European Formation Damage Conference, 30 May-1 June, Scheveningen, The Netherlands. DOI: 10.2118/107337-MS.
- Sobol K. **1980**. *Ciśnienie złożowe w utworach czerwonego spągowca na Niżu Polskim*. Instytut Geologiczny. Tom 28, nr 8. UKD 551.736.1; 622.241.8+556.34:532.5(24:181):553.981/.982 (438:251)
- Sonnenberg S.A., Meckel L. **2017**. *Our Current Working Model for Unconventional Tight Petroleum Systems: Oil and Gas*. AAPG Annual Convention and Exhibition, Houston, Search and Discovery Article, #80589.
- Suarez-Rivera R., Behrmann L., Burghardt J., Stanchits S., Edelman E., Surdi A. **2013**. *Defining Three Regions of Hydraulic Fracture Connectivity in Unconventional Reservoirs, Help Designing Completions with Improved Long-Term Productivity*. SPE 166505, 2013.
- Such J., Leśniak G., Słota M. **2010**. *Ilościowa charakterystyka porowatości i przepuszczalności utworów czerwonego spągowca potencjalnie zawierających gaz ziemny zamknięty*. Przegląd Geologiczny, t. 58, nr 4, s. 347-351.
- Such P., Leśniak G., Mroczkowska-Szerszeń M., Dudek L., Cicha-Szot R., Spunda K. **2017**. *Metodyka analizy przestrzeni porowej skał łupkowych*. Monografia INiG-PIB, s. 1-154. ISSN 2353-2718; ISBN 978-83-65649-21-8
- Sullivan P.F., Gadiyar B., Morales R.H., Hollicek R., Sorrells D., Lee J., Fischer D. **2006**. *Optimization of a Viscoelastic Surfactant (VES) fracturing Fluid for Application in High-Permeability Formations*. SPE 98338, 2006, s. 1-25.
- Sweeney J.J., Burnham A.K. **1990**. *Evaluation of simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics*. AAPG Bulletin, t. 74, s. 1559-1570.
- Szymański B. **2008**. *Zapis litologiczny i mikrofacjalny osadów euksynicznych kambru górnego i tremadoku obniżenia bałtyckiego (północna Polska)*. Biul. Państw. Inst. Geol., 430, s. 113-154.
- Środoń J., Drits V. A., McCarty D. K., Hsieh J.C.C. **2001**. *Quantitative analysis of clay-bearing rocks from random preparations*. Clays and Clay Minerals, t. 49, nr 6.
- Terracina J.M., Turner J.M., Collins D.H., Spillars S.E. **2010**. *Proppant Selection and Its Effect on the Results of Fracturing Treatments Performed in Shale Formations*. SPE 135502, s. 1-6. DOI: 10.2118/135502-MS
- Weaver J.D., Nguyen P.D., Parker M.A., van Batenburg D. **2005**. *Sustaining fracture conductivity*. SPE 94666.
- Wilk A. **2016**. *Prognozowanie ciśnień porowych w ośrodku geologicznym z wykorzystaniem modułu Seismic Pore Pressure Modeling firmy WesternGeco*. Nafta-Gaz, nr 2, s. 79-86. DOI: 10.18668/NG.2016.02.01
- Wilk K. **2019**. *Experimental and Simulation Studies of Energized Fracturing Fluid Efficiency in Tight Gas Formations*. Energies, 12 (23), 4465. Doi.org/10.3390/en12234465
- Wilk K., Kasza P. **2016**. *Zastosowanie płynów spienionych do zabiegów hydraulicznego szczelinowania*. Przemysł Chemiczny, nr 6, s. 1202-1205.

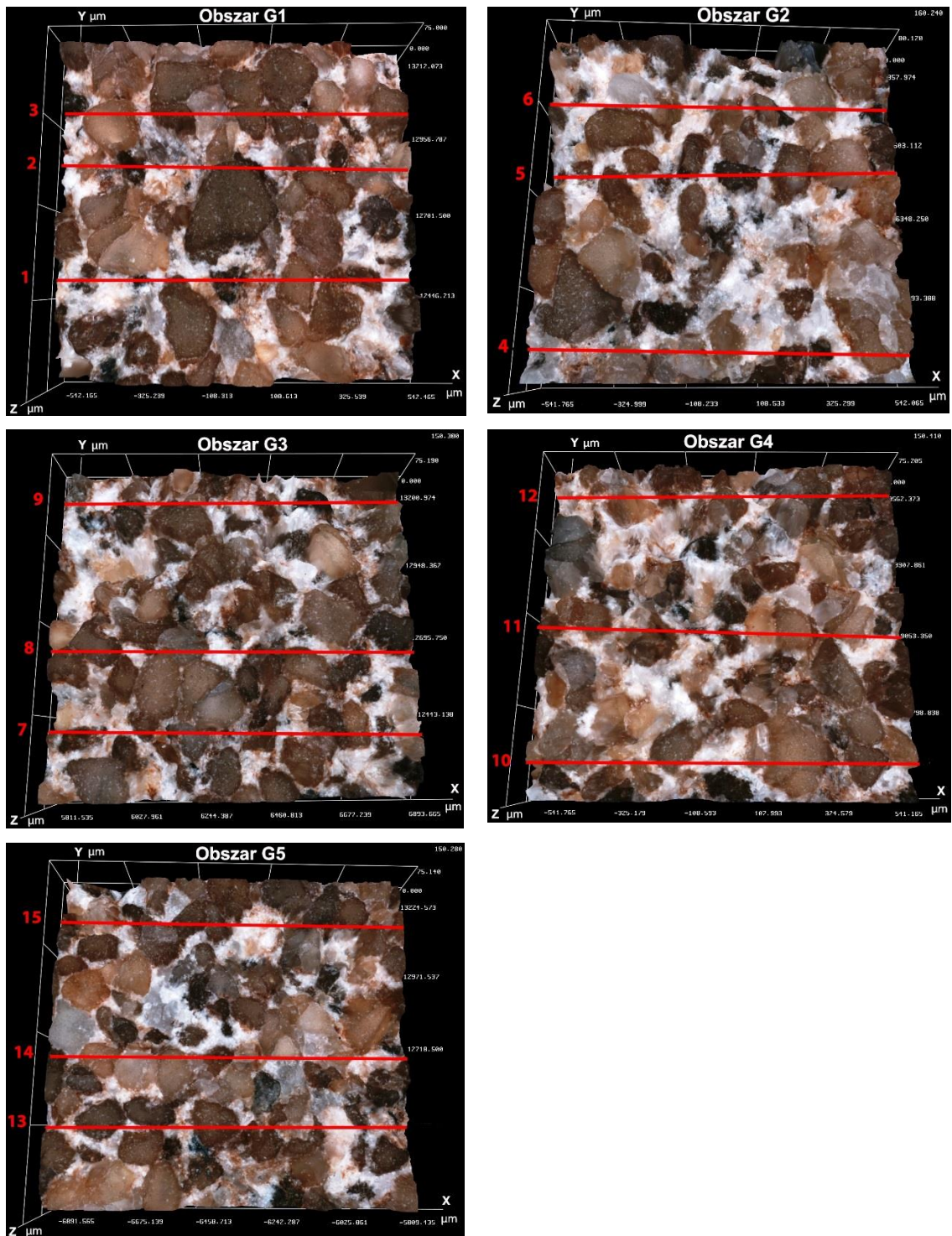
- Wilk K., Kasza P., Czupski M. **2015**. *Analiza możliwości zastosowania płynów energetyzowanych do szczelinowania*. Nafta-Gaz, nr 3, s. 139-148.
- Wilk K., Kasza P., Masłowski M. **2021**. *Laboratory Testing of Fracture Conductivity Damage by Foam-Based Fracturing Fluids in Low Permeability Tight Gas Formations*. Energies, 14 (6), 1783, s. 1-17. <https://doi.org/10.3390/en14061783>
- Wójcicki A., Kiersnowski H., Dyrka I., Adamczak-Biały T., Becker A., Głuszyński A., Janas M., Kozłowska A., Krzemiński L., Kuberska M., Paczeńska J., Podhalańska T., Roman M., Skowroński L., Waksmundzka M.I. **2014**. *Prognostyczne zasoby gazu ziemnego w wybranych zwięzłych skałach zbiornikowych Polski*. Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa, s. 1-65.
- Wu, H., Zhang, P., Dong, S., Huang, Y. and Zhang, M. **2019**. *Brittleness index analysis of coal samples*. Acta Geophysica, 67, s. 789-797. DOI: 10.1007/s11600-019-00291-5
- Volk L. J., Raible C. J., Carrol H. B., Spears J. S. **1981**. *Embedment of high strength proppant into low-permeability reservoir rock*. SPE/DOE 9867, s. 349-363.
- Xu G., Pei X., Shi Y., Jiang Y., Yang X. **2018**. *Theoretical analysis of characteristics and influencing factors for channel fracturing conductivity*. Journal of Natural Gas Science and Engineering 57, 2018, s. 166–177.
- Zhang J., Hou J. **2016**. *Theoretical conductivity analysis of surface modification agent treated proppant II - channel fracturing application*. Fuel 165, s. 28–320.
- Zhang J., Ouyang L., Hill A.D., Zhu D. **2014**. *Experimental and Numerical Studies of Reduced Fracture Conductivity due to Proppant Embedment in Shale Reservoirs*. SPE 170755-MS, 2014, s.1-15.
- Zhang F., Zhu H., Zhou H., Guo J., Bo H. **2017**. *Discrete-Element-Method/Computational-Fluid-Dynamics Coupling Simulation of Proppant Embedment and Fracture Conductivity After Hydraulic Fracturing*. SPE J. 22 (02), s. 632-644. SPE 185172, 2017. DOI: 10.2118/185172-PA
- Zheng X., Chen M., Hou B., Ye Z., Wang W., Yin C., Chen X. **2017**. *Effect of proppant distribution pattern on fracture conductivity and permeability in channel fracturing*. J. Pet. Sci. Eng. 149, s. 98–106.

## **Akty prawne i normatywne**

- API RP 13M, **2004** / ISO 13503-1, **2003**. *Recommended Practice for the Measurement of Viscous Properties of Completion Fluids / Petroleum and natural gas industries – Completion fluids and materials – Part 1: Measurement of viscous properties of completion fluids*. First Edition, July 2004 / 2003.
- API RP 61, **1989**. American Petroleum Institute: “Recommended Practices for Evaluating Short Term Proppant Pack Conductivity”. First edition, 1989.
- ISO 13503-2:2006(E), **2006**. *Petroleum and natural gas industries – Completion fluids and materials – Part 2: Measurement of properties of proppants used in hydraulic fracturing and gravel-packing operations, Annex A – Formazin solution preparation*. First edition, 01.11.2006.
- ISO 13503-2:2006/Amd.1:2009(E), **2009**. *Petroleum and natural gas industries – Completion fluids and materials – Part 2: Measurement of properties of proppants used in hydraulic fracturing and gravel-packing operations*. AMENDMENT 1: Addition of Annex B: Proppant specification. 01.11.2009.
- ISO 13503-5:2006, **2006**. *Petroleum and natural gas industries – Completion fluids and materials - Part 5: Procedures for Measuring the Long-term Conductivity of Proppants*. First edition, 2006.
- PN-EN ISO 4287, **1999**. *Specyfikacje geometrii wyrobów. Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa. Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni*. Polski Komitet Normalizacyjny. 11.1999.
- PN-EN ISO 13503-2, **2010**. *Przemysł naftowy i gazowniczy – Płyiny i materiały do dowiercania złóż – Część 2: Pomiary właściwości materiałów podsadzkowych używanych podczas zabiegów hydraulicznego szczelinowania oraz wykonywania obsypki żwirowej (ISO 13503-2:2006)*. Polski Komitet Normalizacyjny. Warszawa, styczeń 2010
- PN-EN ISO 13503-5, **2009**. *Przemysł naftowy i gazowniczy – Materiały i płyny do dowiercania złóż – Część 5: Procedury pomiaru długotrwałej przewodności materiałów podsadzkowych (ISO 13503-5:2006)*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, wrzesień 2009.

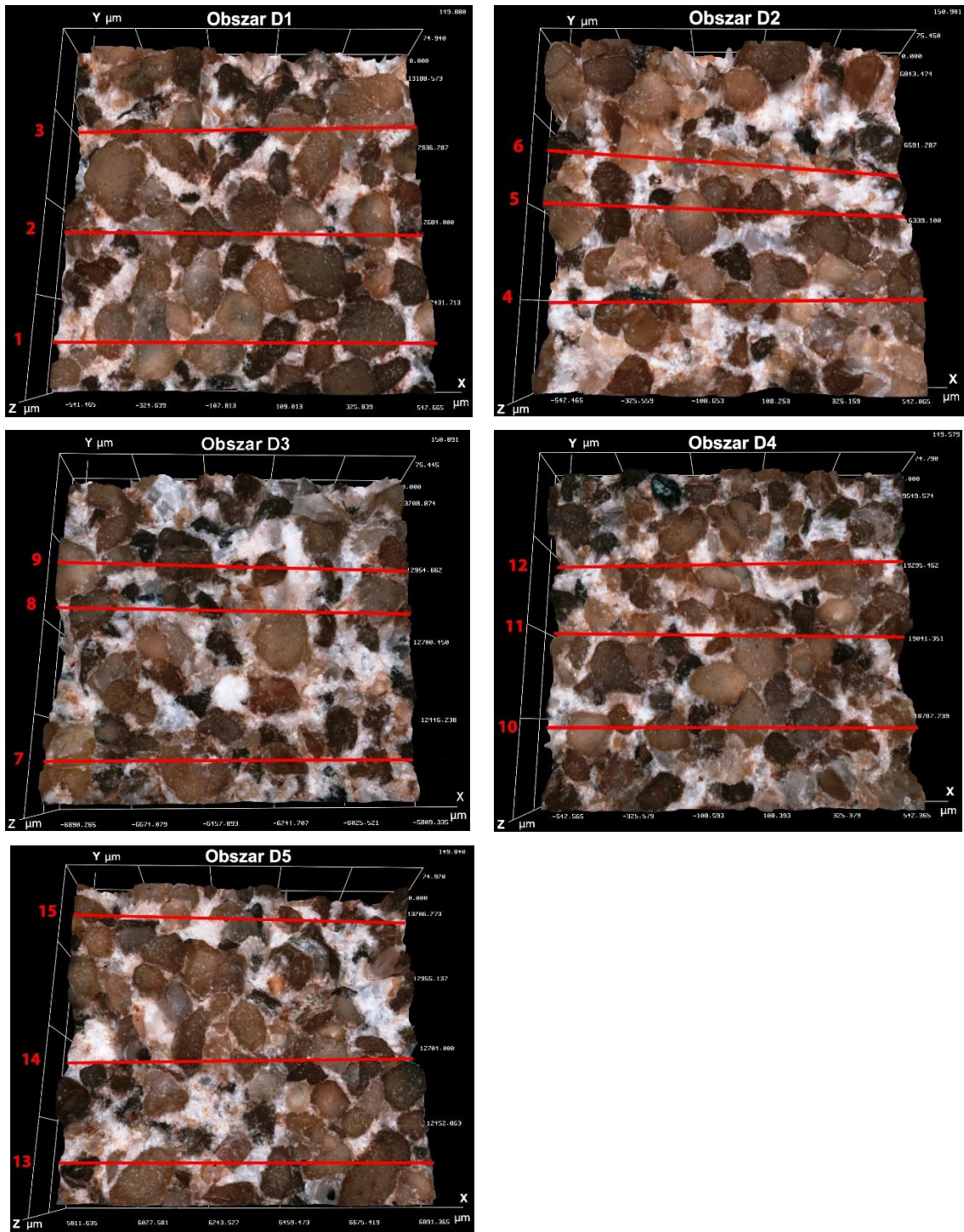
## **Załącznik**

Obrazy mikroskopowe powierzchni rdzeni  
badanych skał

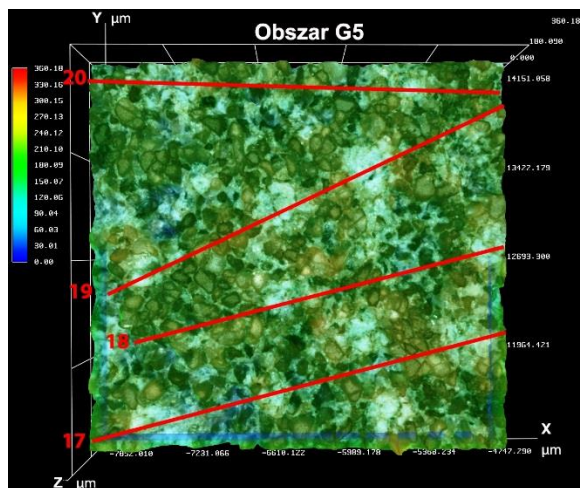
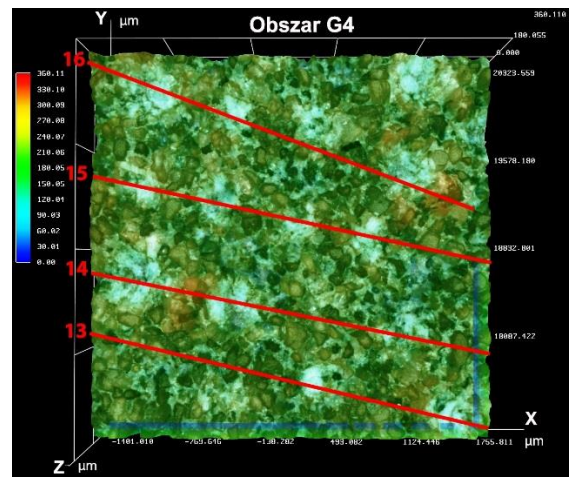
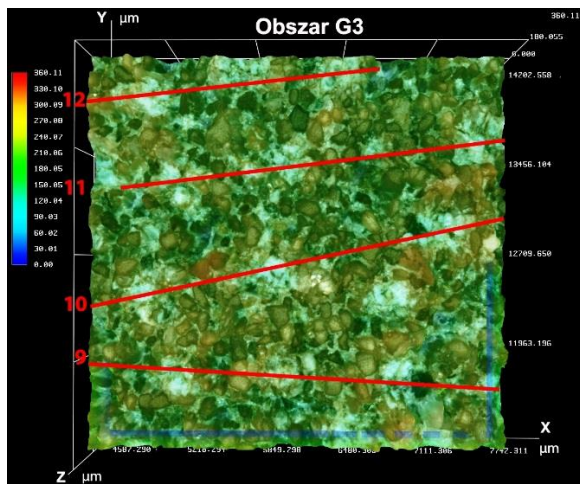
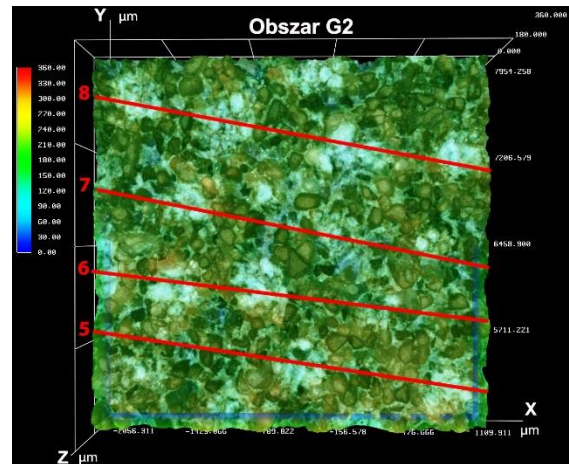
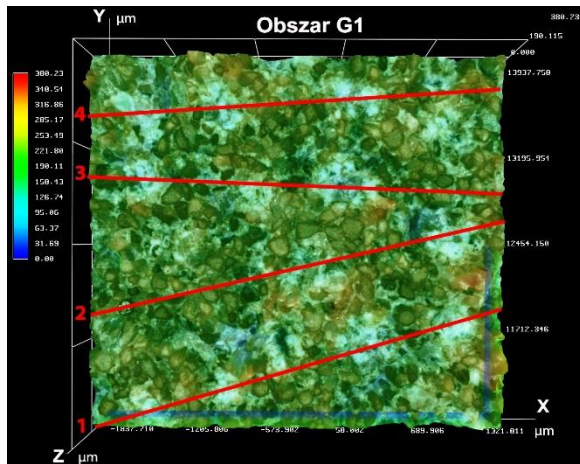


Rys. Z-1 Obrazy pierwotnej powierzchni czolowej rdzenia górnego w obszarach od G1 do G5 wraz z odcinkami pomiarowymi chropowatości powierzchni ściany szczeliny. Piaskowiec – test 1



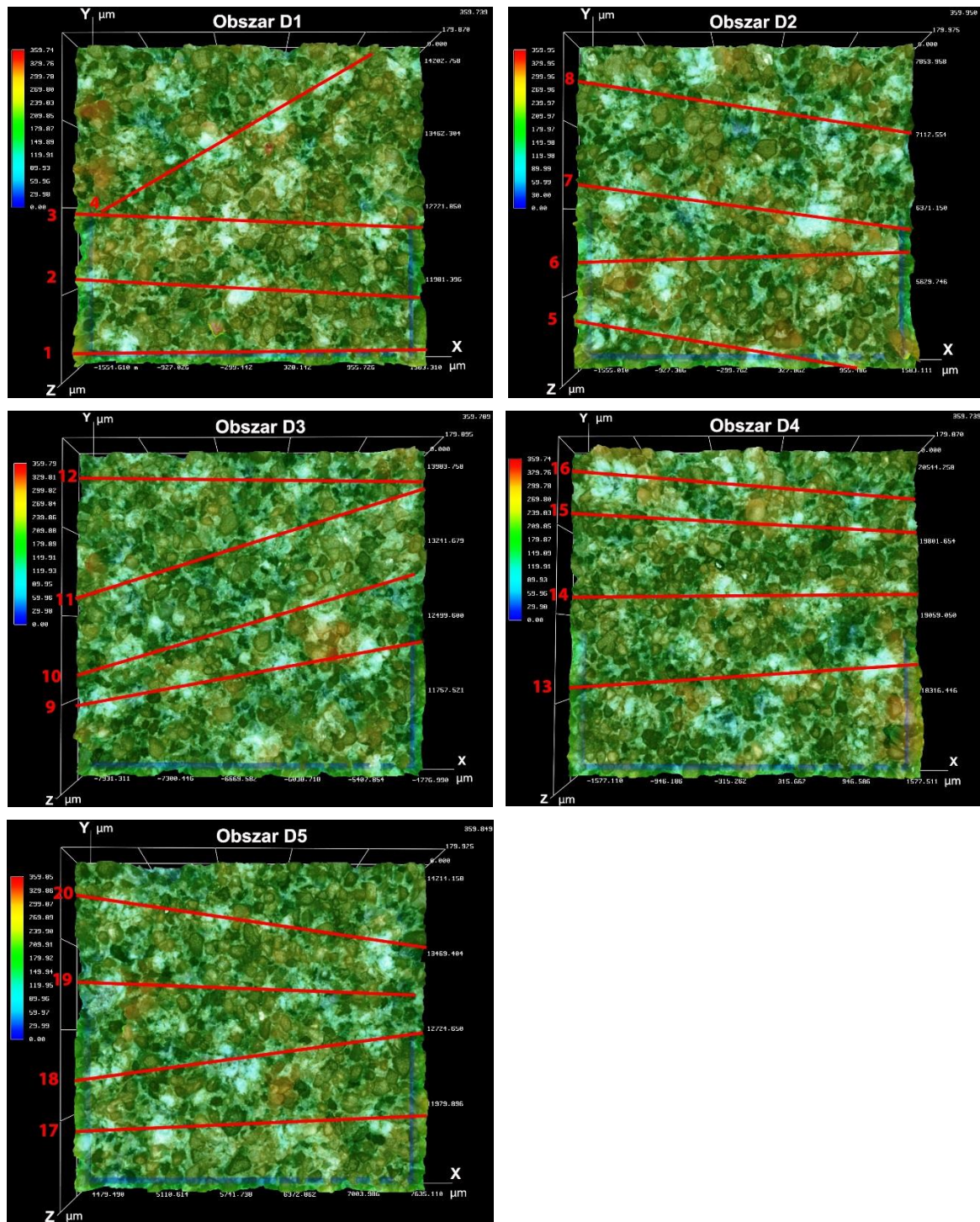


Rys. Z-2 Obraz pierwotnej powierzchni czołowej rdzenia dolnego w obszarach od D1 do D5 wraz z odcinkami pomiarowymi chropowatości powierzchni ściany szczeliny. Piaskowiec – test 1

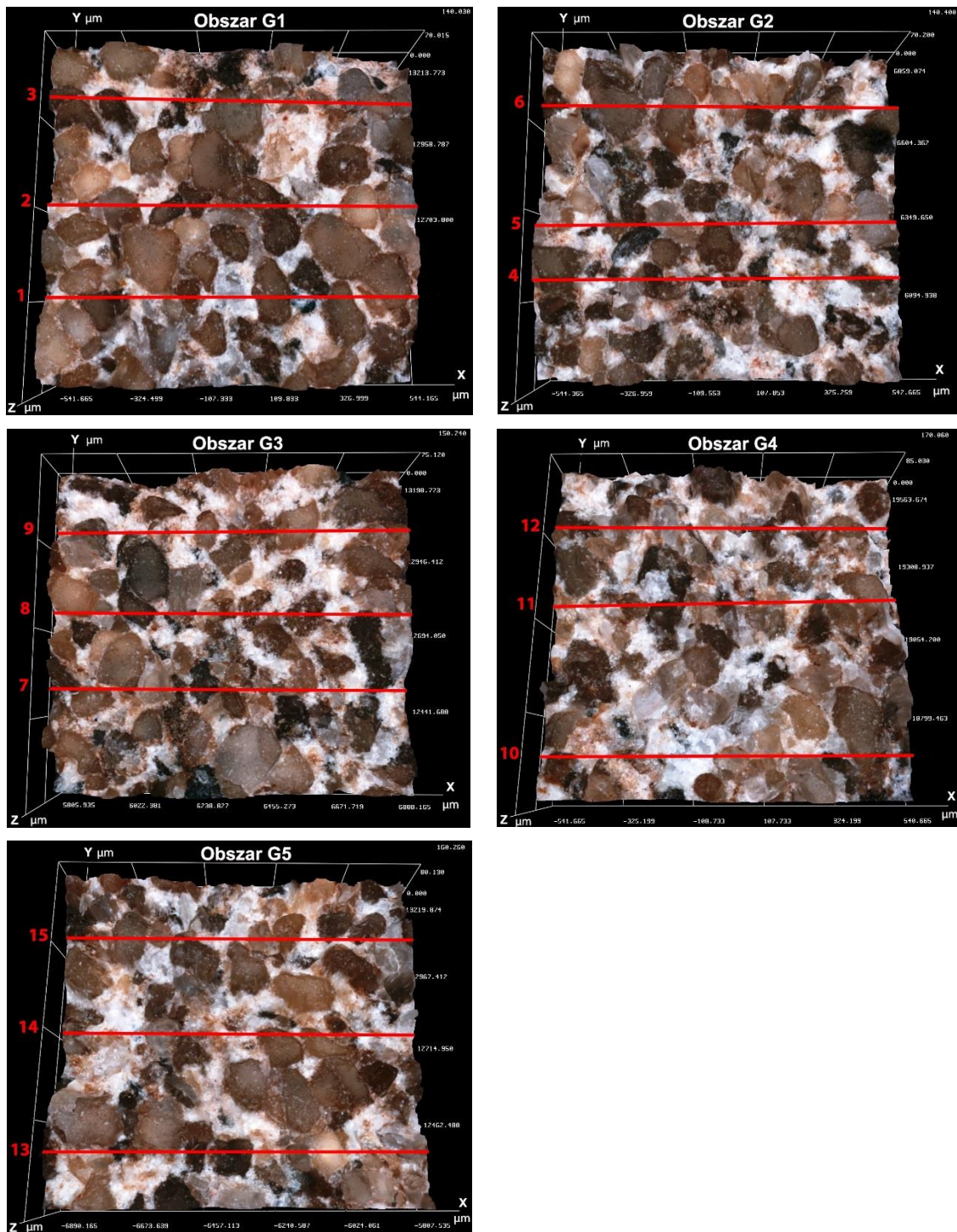


Rys. Z-3 Obraz uszkodzonej przez ziarna podsadzki powierzchni czołowej rdzenia górnego w obszarach od G1 do G5 wraz z odcinkami pomiarowymi wgnieć ziaren i wycisku materiału skalnego, dla ściany szczeliny. Piaskowiec – test 1



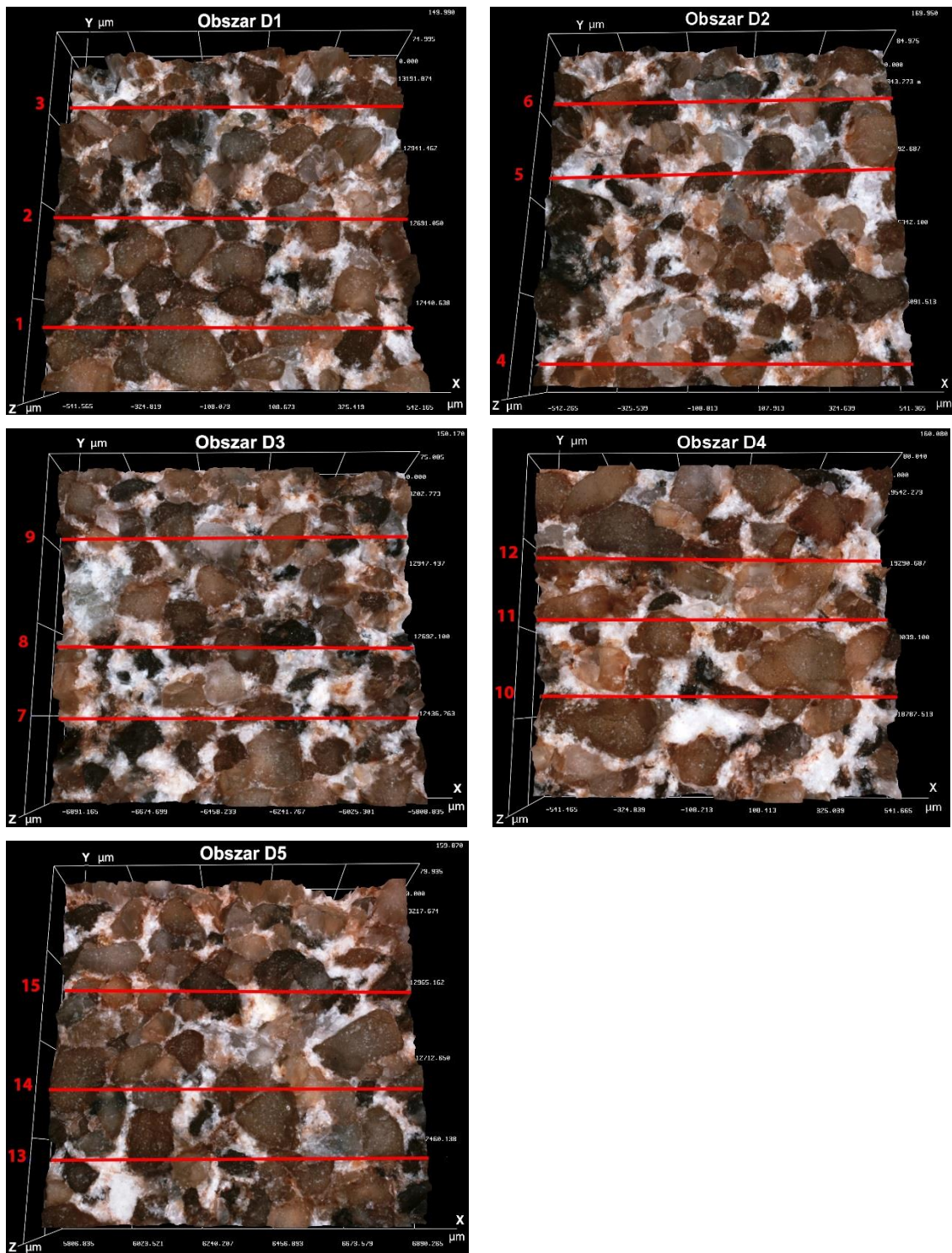


Rys. Z-4 Obraz uszkodzonej przez ziarna podsadzki powierzchni czołowej rdzenia dolnego w obszarach od D1 do D5 wraz z odcinkami pomiarowymi wgniecień ziaren i wycisku materiału skalnego, dla ściany szczeliny. Piaskowiec – test 1

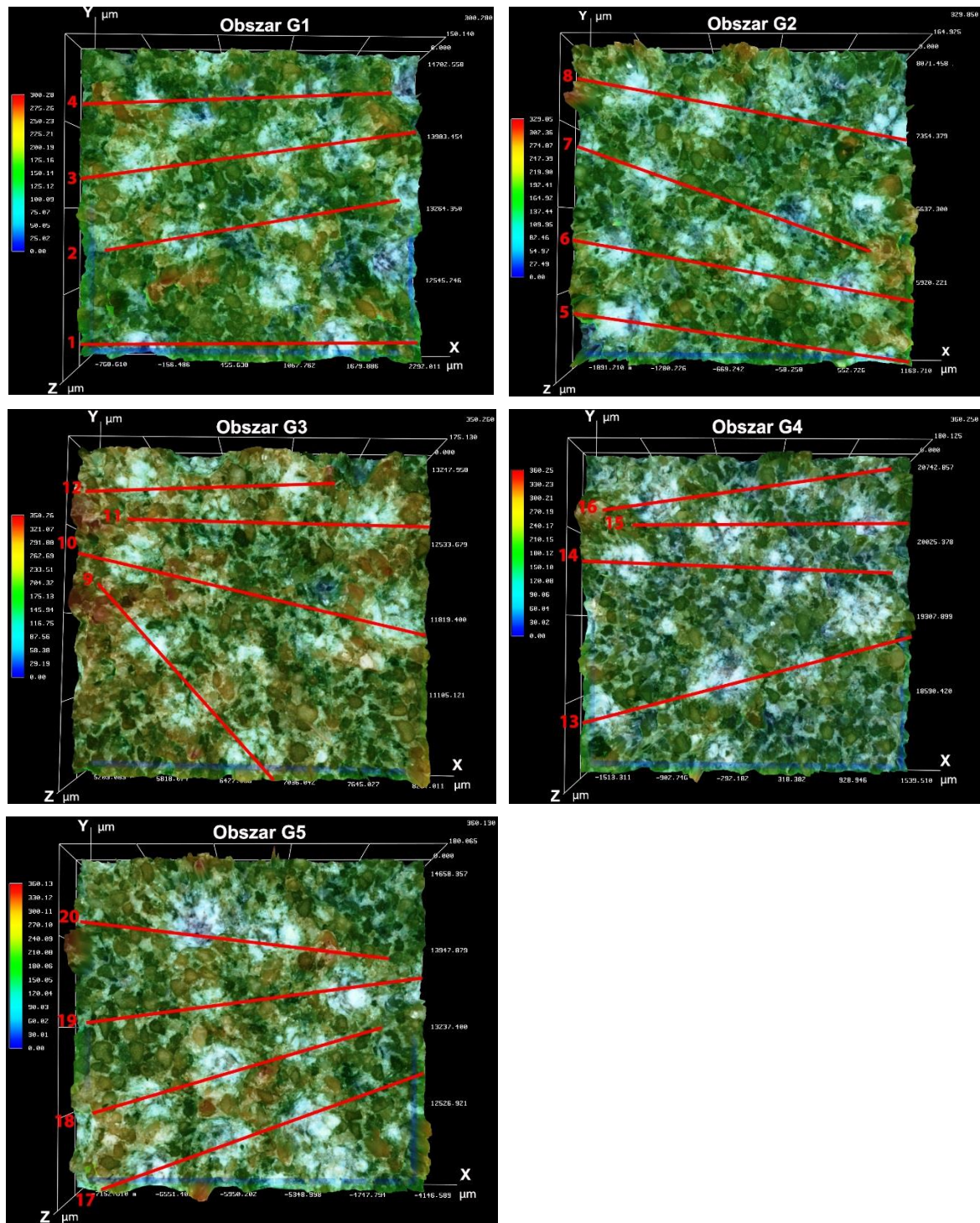


Rys. Z-5 Obraz pierwotnej powierzchni czołowej rdzenia górnego w obszarach od G1 do G5 wraz z odcinkami pomiarowymi chropowatości powierzchni ściany szczeliny. Piaskowiec – test 2



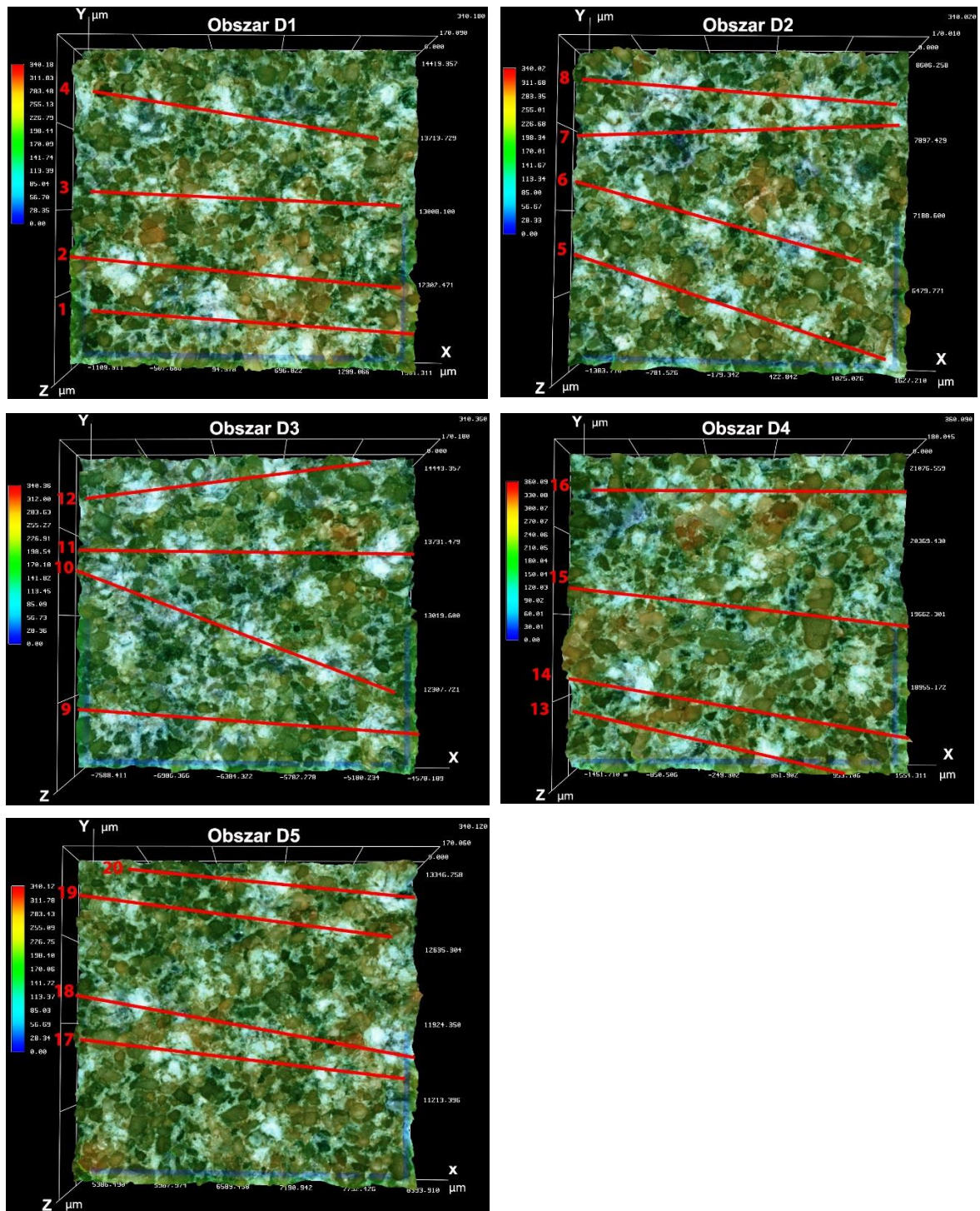


Rys. Z-6 Obraz pierwotnej powierzchni czołowej rdzenia dolnego w obszarach od D1 do D5 wraz z odcinkami pomiarowymi chropowatości powierzchni ściany szczeliny. Piaskowiec – test 2.



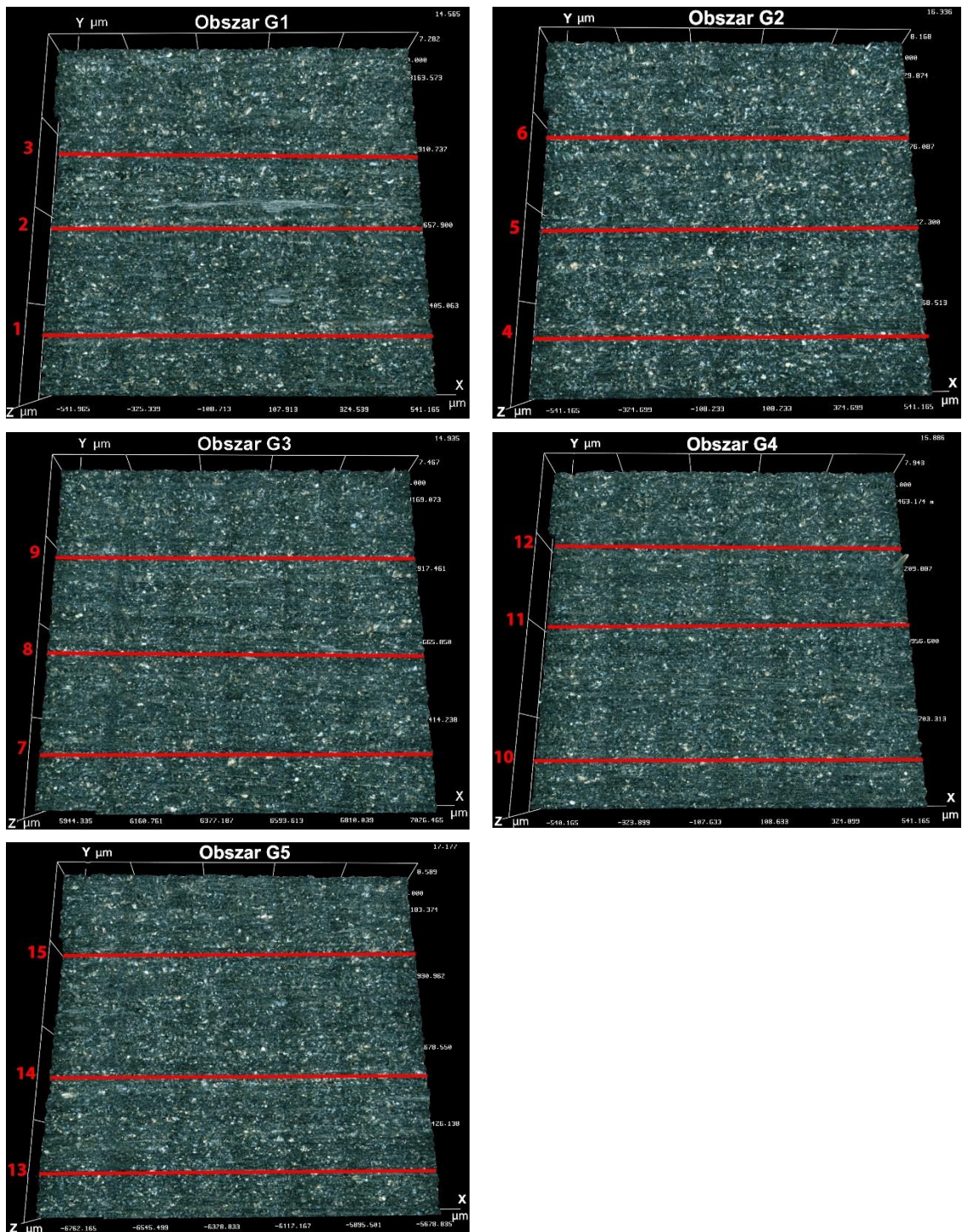
Rys. Z-7 Obraz uszkodzonej przez ziarna podsadki powierzchni czołowej rdzenia górnego w obszarach od G1 do G5 wraz z odcinkami pomiarowymi wgniecień ziaren i wycisku materiału skalnego, dla ściany szczeliny. Piaskowiec – test 2





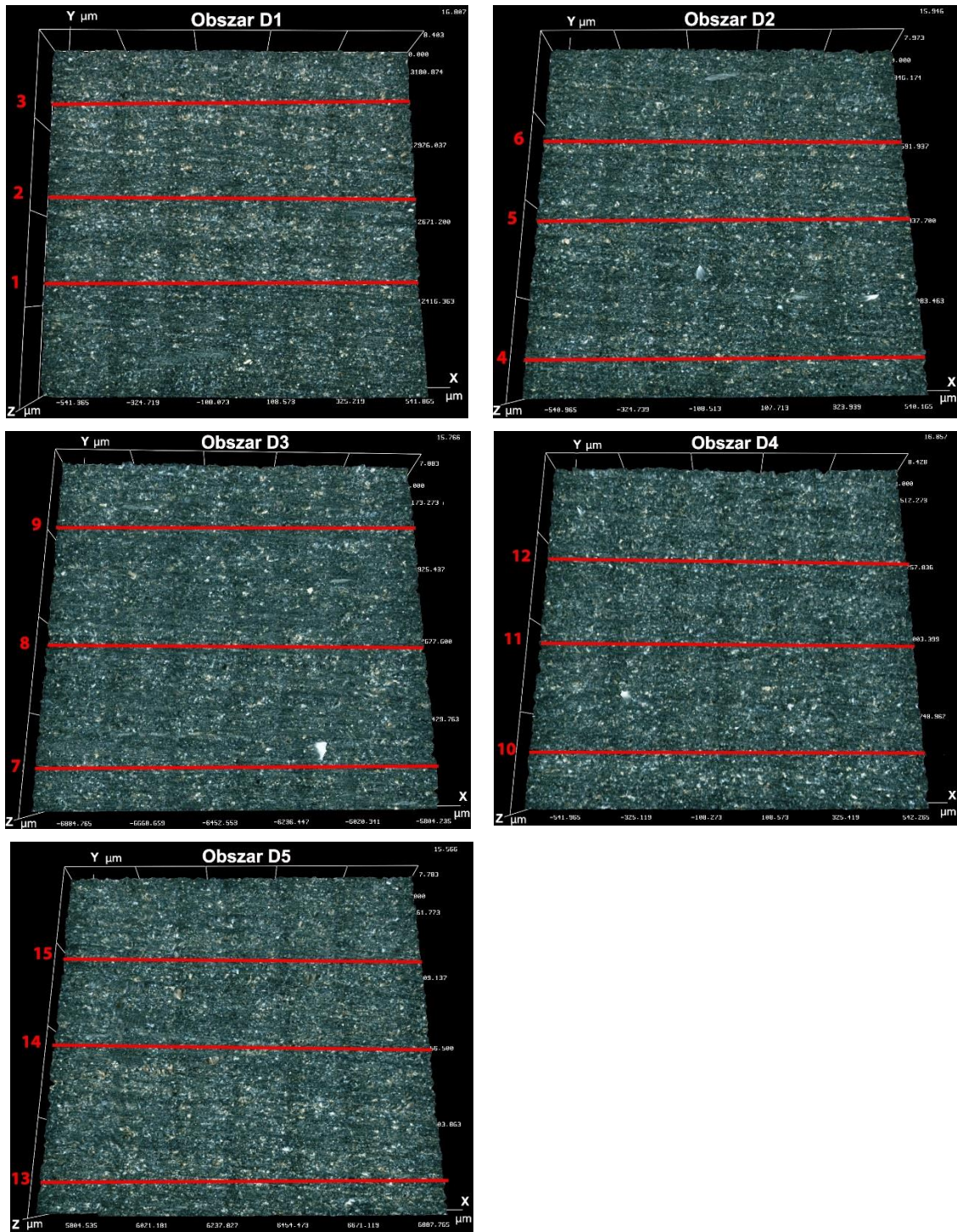
Rys. Z-8 Obraz uszkodzonej przez ziarna podsadzki powierzchni czołowej rdzenia dolnego w obszarach od D1 do D5 wraz z odcinkami pomiarowymi wgniecień ziaren i wycisku materiału skalnego, dla ściany szczeliny. Piaskowiec – test 2





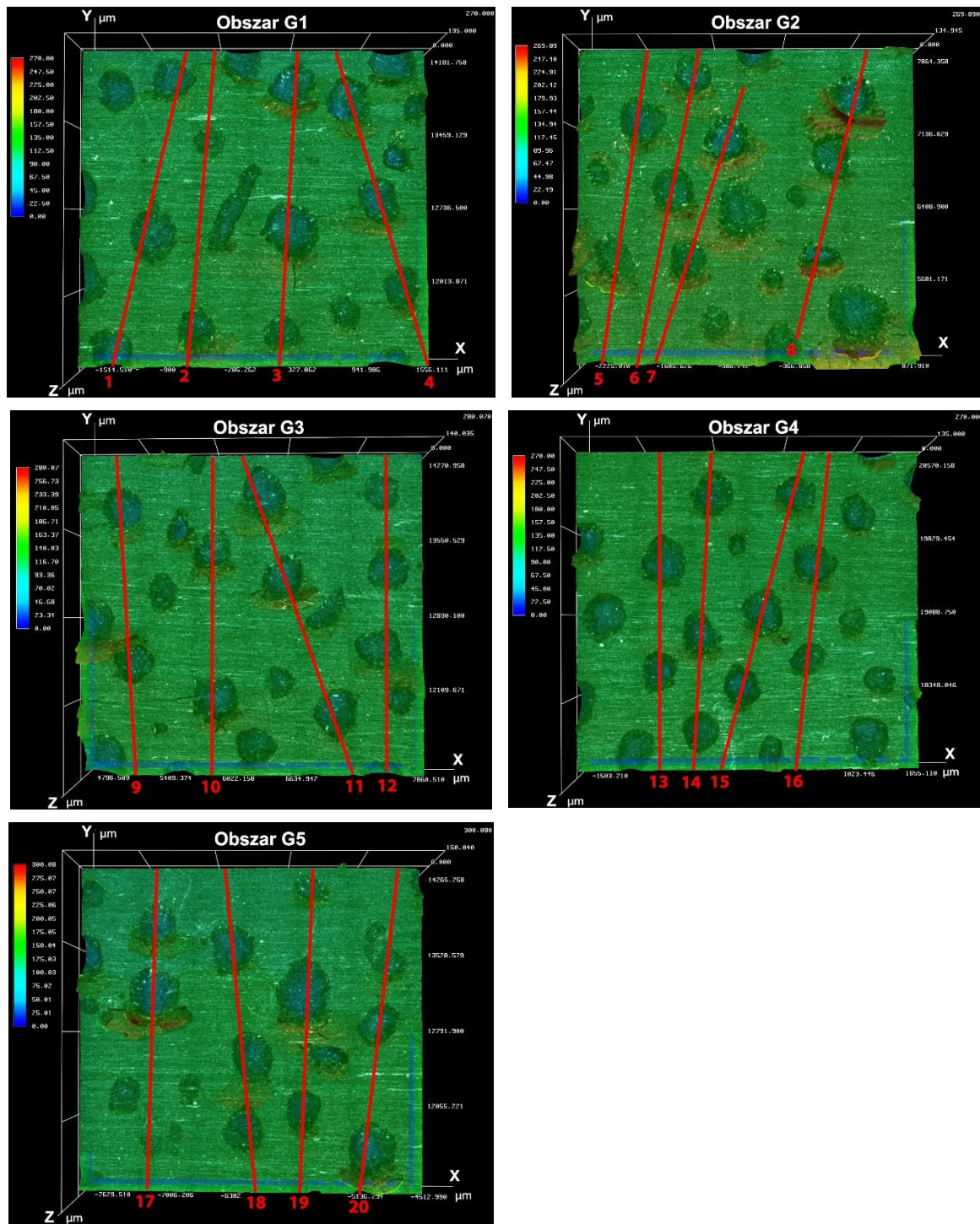
Rys. Z-9 Obraz pierwotnej powierzchni czołowej rdzenia górnego w obszarach od G1 do G5 wraz z odcinkami pomiarowymi chropowatości powierzchni ściany szczeliny. Łupek – test 3



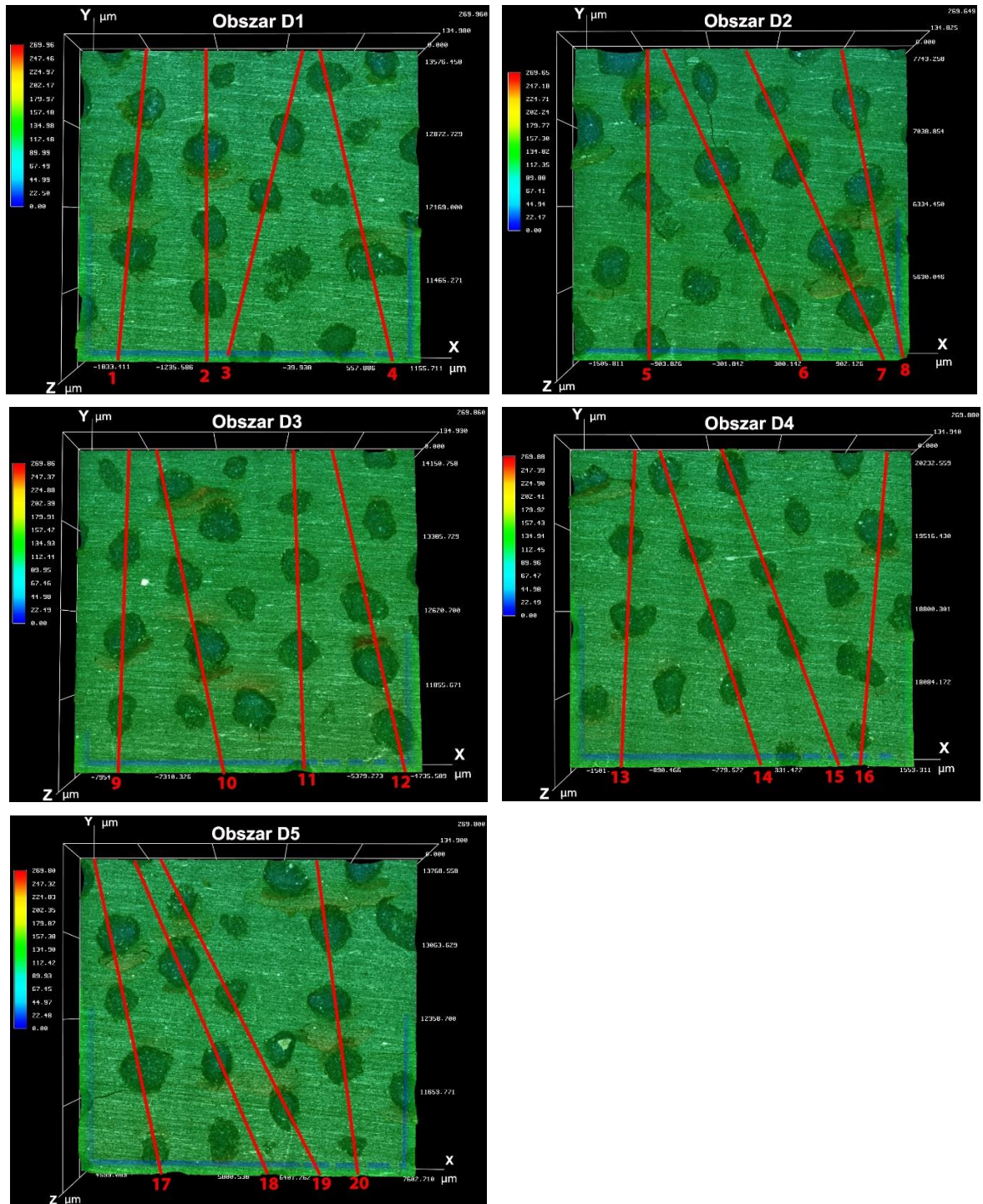


Rys. Z-10 Obraz pierwotnej powierzchni czołowej rdzenia dolnego w obszarach od D1 do D5 wraz z odcinkami pomiarowymi chropowatości powierzchni ściany szczeliny. Łupek – test 3



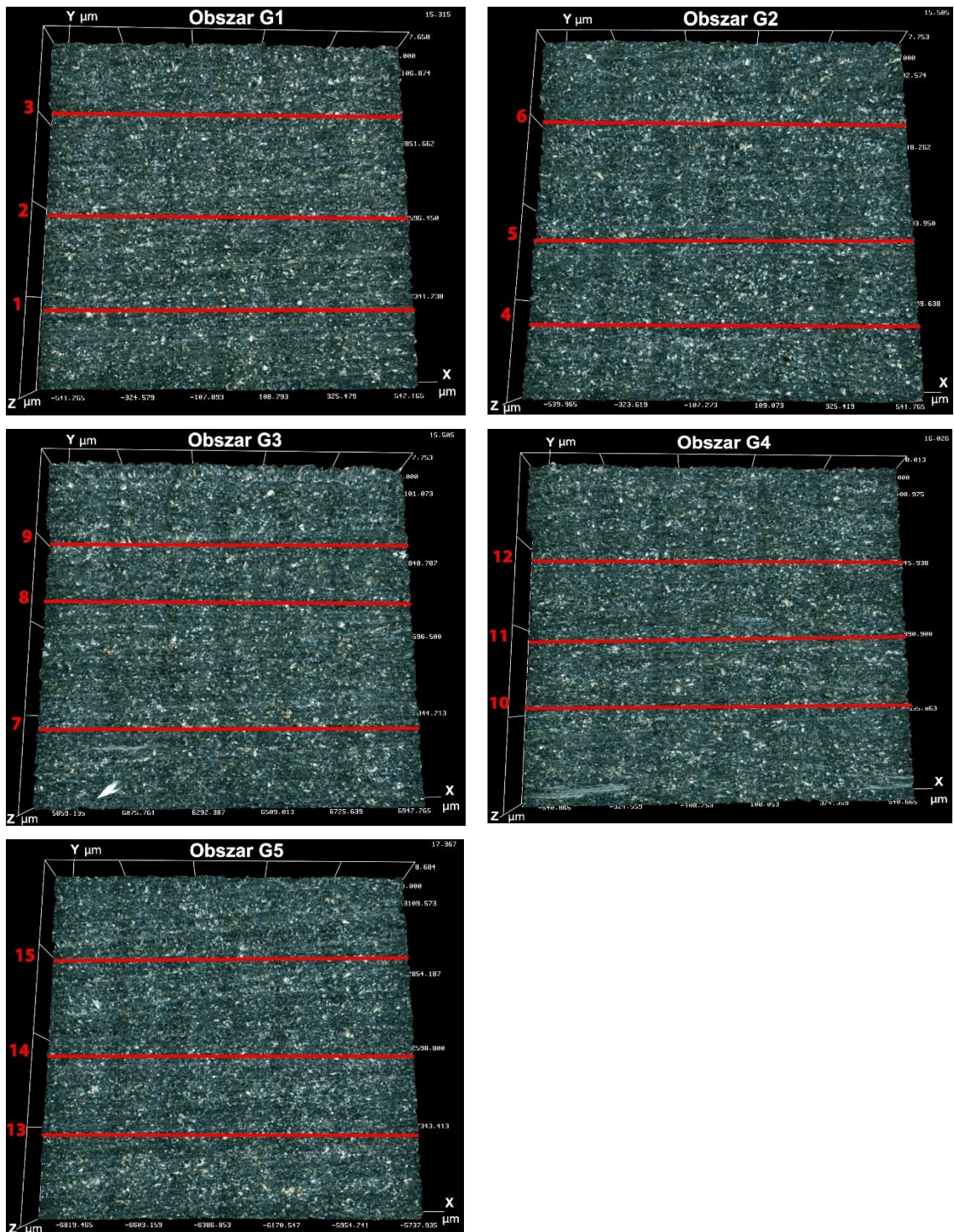


Rys. Z-11 Obraz uszkodzonej przez ziarna podsadzki powierzchni czołowej rdzenia górnego w obszarach od G1 do G5 wraz z odcinkami pomiarowymi wgniecień ziaren i wycisku materiału skalnego, dla ściany szczeliny. Łupek – test 3



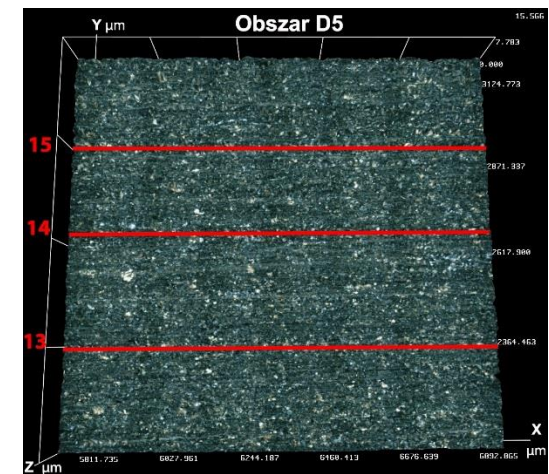
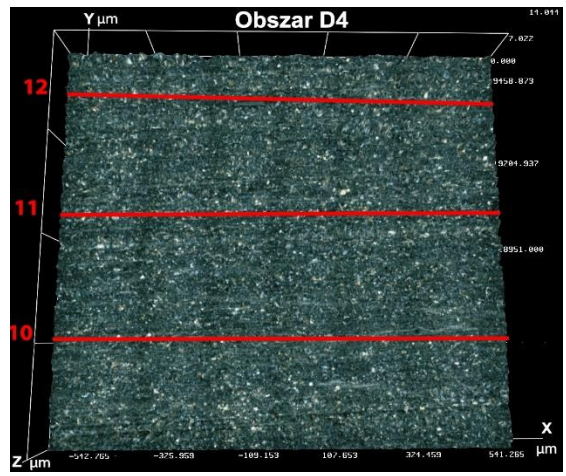
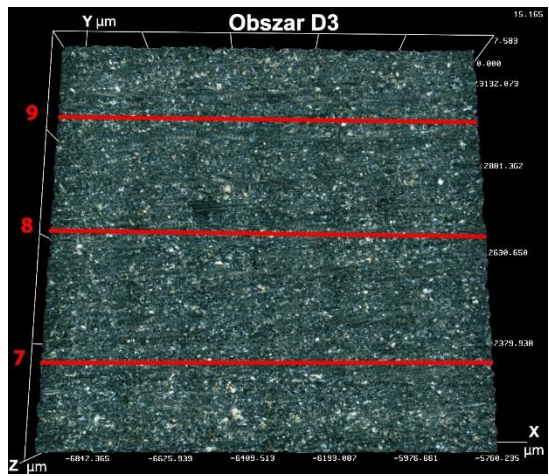
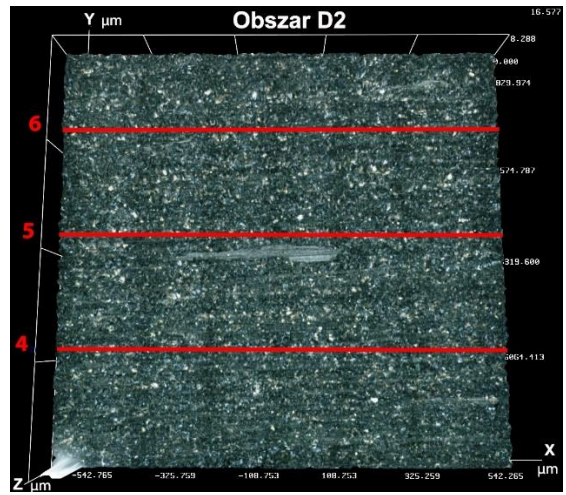
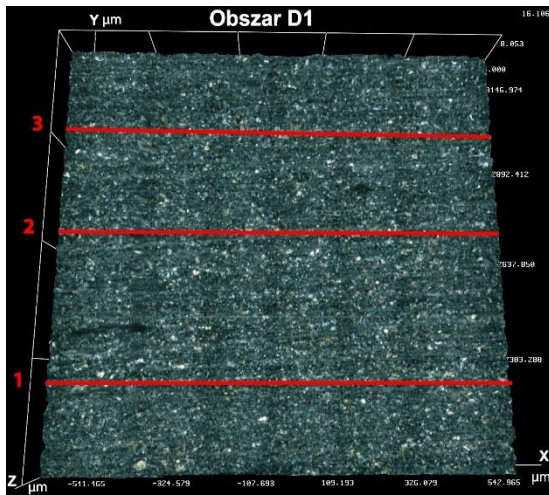
Rys. Z-12 Obraz uszkodzonej przez ziarna podsadzki powierzchni czołowej rdzenia dolnego w obszarach od D1 do D5 wraz z odcinkami pomiarowymi wgnieceń ziaren i wycisku materiału skalnego, dla ściany szczeliny. Łupek – test 3



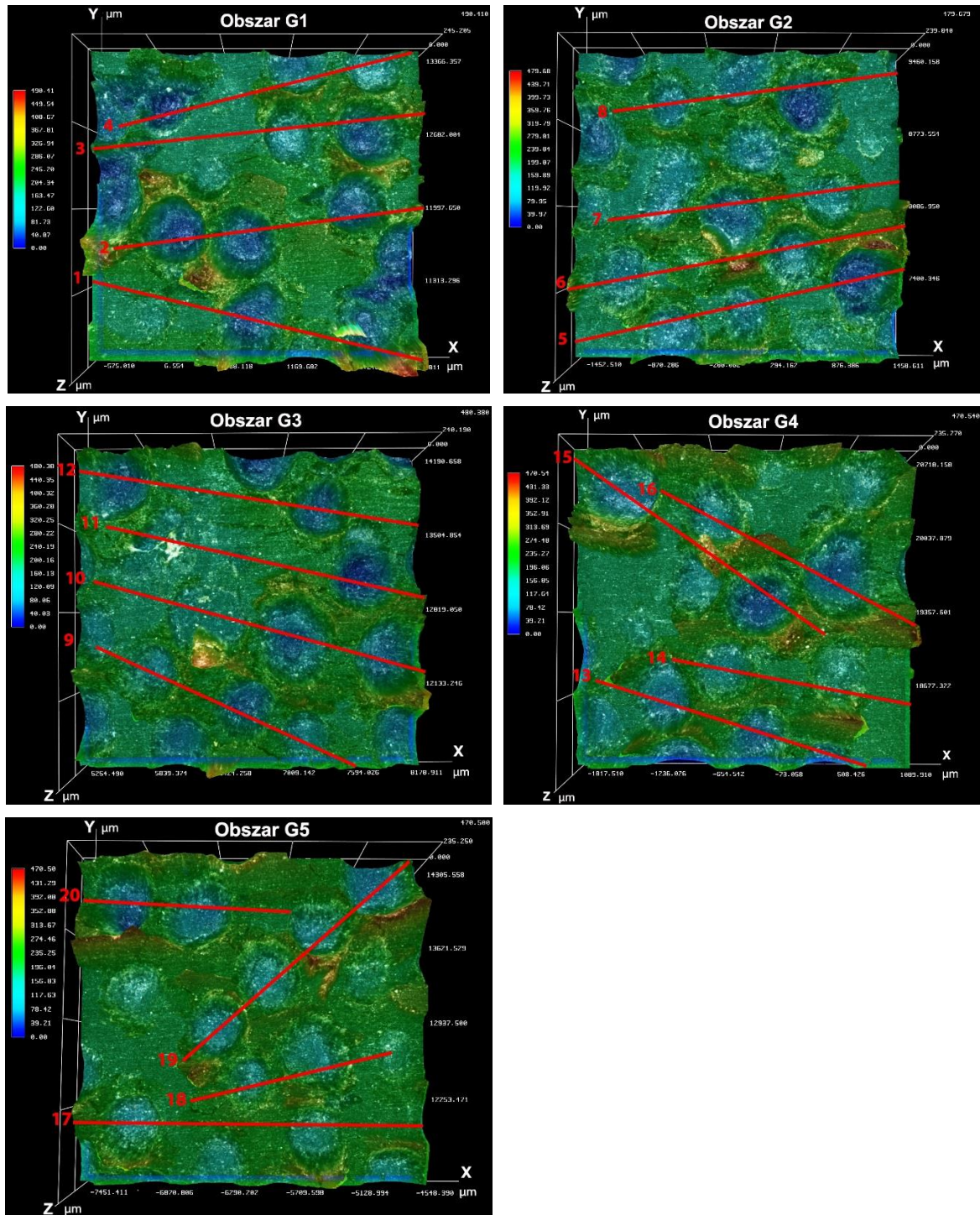


Rys. Z-13 Obraz pierwotnej powierzchni czołowej rdzenia górnego w obszarach od G1 do G5 wraz z odcinkami pomiarowymi chropowatości powierzchni ściany szczeliny. Łupek – test 4



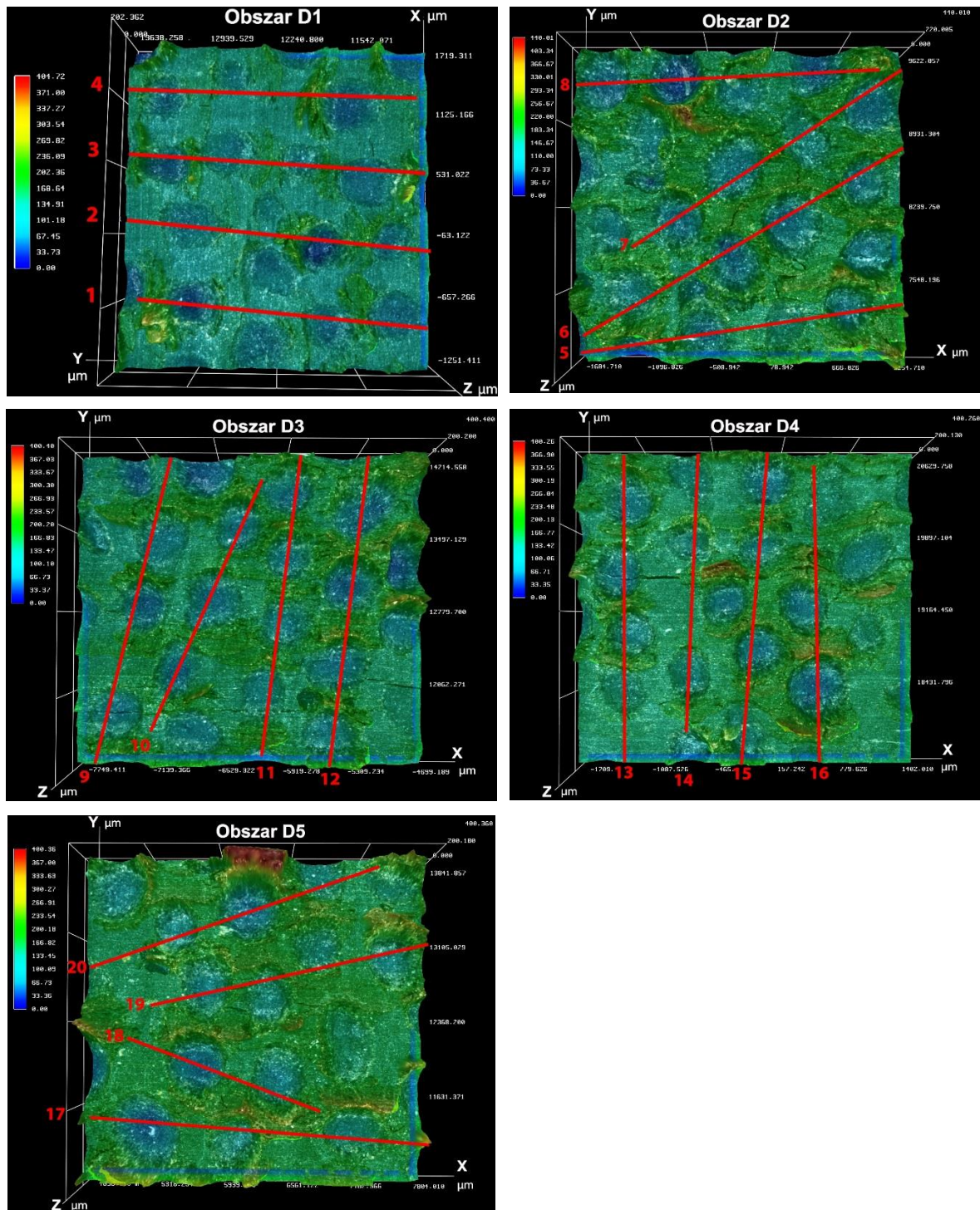


Rys. Z-14 Obraz pierwotnej powierzchni czołowej rdzenia dolnego w obszarach od D1 do D5 wraz z odcinkami pomiarowymi chropowatości powierzchni ściany szczeliny. Łupek – test 4



Rys. Z-15 Obraz uszkodzonej przez ziarna podsadzki powierzchni czołowej rdzenia górnego w obszarach od G1 do G5 wraz z odcinkami pomiarowymi wgniecień ziaren i wycisku materiału skalnego, dla ściany szczeliny. Łupek – test 4





Rys. Z-16 Obraz uszkodzonej przez ziarna podsadzki powierzchni czołowej rdzenia dolnego w obszarach od D1 do D5 wraz z odcinkami pomiarowymi wgniecień ziaren i wycisku materiału skalnego, dla ściany szczeliny. Łupek – test 4