

# **Optymalizacja procedury szczelinowania hydraulicznego za pomocą symulacji numerycznej**

**Autorzy:**

**Johannes Will (Dynardo), Przemysław Siedlaczek, Stanisław Wowra (MESco)**

## **Wprowadzenie**

Złoże gazu ziemnego i ropy naftowej znajdują się często w warstwach skalnych o niskiej przepuszczalności (np. Barnett Shale w Teksasie, USA). Aby możliwa była eksploatacja złoża ropy naftowej lub gazu ziemnego z zyskiem, niezbędne jest zwiększenie przepuszczalności złoża. Z tego powodu w branży gazowej i naftowej jest rutynowo stosowane szczelinowanie hydrauliczne. Ma ono na celu utworzenie dużej sieci szczelin umożliwiając ujście uwięzionego w skale gazu. Istotna jest więc maksymalizacja objętości spękanej skały zbiornikowej, a w konsekwencji maksymalizacja produkcji gazu. Przy dostępie dzisiejszych technologii pomiarowych, takich jak mapy sejsmiczne, można określić objętość i wydajność aktualnie eksploatowanego złoża. Należy jednak zwrócić uwagę na to, że dostępność technologii diagnostycznych nie pozwala przewidzieć skuteczności różnych wariantów szczelinowania hydraulicznego w konkretnym, zbadanym złożu. Nie można również przewidzieć jak konkretny, przetestowany sposób odwiertu będzie się sprawdzał na innym złożu. W przeważającej większości przypadków najodpowiedniejszy przebieg odwiertu jak i parametry procesu szczelinowania są dobierane metodą prób i błędów.

Obecne doświadczenia autorów wskazują że projektowanie i optymalizacja szczelinowania hydraulicznego za pomocą symulacji komputerowej metodą elementów skończonych (MES) stanowi bardzo obiecującą metodę diagnostyczną diagnozowania. Jest to także najmniej kosztowny sposób na dostrojenie parametrów technologicznych wydobywania w celu uzyskania maksymalnego zysku.

Do analizy procesu szczelinowania hydraulicznego obecnie używane są głównie branżowe programy komputerowe stworzone na bazie doświadczenia pochodzącego z procesów wydobywania gazu konwencjonalnego lub górniczego. Jednak uzyskane dzięki nim wyniki często są nieprawidłowe. Jest to rezultatem wprowadzonych uproszczeń, zaniechania opisu przestrzennej propagacji szczelin oraz przepływu w złożu. Z drugiej strony, szczegółowe modele komputerowe, opierające się na mechanice pęknięcia są kosztowne obliczeniowo. Również trudno jest określić w nich poprawne wartości początkowe co przekłada się ponownie na małą wiarygodność uzyskiwanych dzięki nim wyników.

Z powyższych powodów, konieczne jest połączenie obu technik ze sobą, wydajnego modelowania oraz opracowań badań, tak aby bezpośrednie pomiary fizyczne wzrostu szczelin były sprzężone z modelem komputerowym. Parametry wejściowe modelu – nawet bazujące na najlepszych dostępnych danych o złożu – muszą zostać skalibrowane w oparciu o bezpośrednie pomiary diagnostyczne tak, aby możliwe było określenie poziomów istotności różnych mechanizmów propagacji pęknięć. Jedynie za pomocą sprzężenia charakterystyki sejsmicznej złoża i modelowania komputerowego za pomocą MES, możliwe jest umożliwić poprawne zrozumienie mechanizmu tworzenia się i propagacji szczelin w podziemnym rezerwuarze. Dopiero za pomocą skalibrowanego modelu predykcyjnego, możliwe jest zoptymalizowanie wydobywania. Innymi słowy, dobrane mogą być najlepsze parametry procesu w celu zapewnienia maksymalnej przepuszczalności złoża.

Podstawą ekonomicznie uzasadnionej symulacji komputerowej jest wykorzystanie modelu obliczeniowego działającego z wystarczającą dokładnością i skutecznością. Jest to bardzo istotne w przypadkach, gdy muszą być wzięte pod uwagę efekty trójwymiarowej propagacji pęknięć. W tym przypadku, powszechnie stosowane w branży gazowej i naftowej komercyjne narzędzia osiągają swoje granice. Potrzebne jest więc skuteczne oprogramowanie do modelowania i symulacji

problemów trójwymiarowych. Skuteczna symulacja hydraulicznego szczelinowania 3D nie oznacza wykonania pojedynczego przeliczenia a raczej, w celu optymalizacji wydobywania, potrzebna jest praca na wielowariantowym modelu parametrycznym. Jednostkowa symulacja musi być efektywna pod kątem dokładności i czasu rozwiązania, ponieważ podczas kalibracji i optymalizacji konieczne są wielokrotne analizy dla kilkuset różnych wariantów projektowych. Dlatego równowaga między dokładnością a skutecznością modelu komputerowego jest stałym wyzwaniem stawianym metodom komputerowym w produkcji.

## **Czy naprawdę musimy uwzględnić trójwymiarowy model?**

Kiedy rezerwuar charakteryzuje się znaczną anizotropią własności materiałowych i wytrzymałości, trójwymiarowe modelowanie staje się bezwzględnie konieczne. W przypadku złóż warstwowych, takich jak skały osadowe z mezozoiku czy paleozoiku do których należą łupki gazonośne, na zachowanie układu ma wpływ przestrzenna orientacja warstw. W przypadku skał łupkowych dodatkowym źródłem anizotropii są systemy ułożenia skał, tzw. ciosy, będące zbiorem seryjnych spękań i szczelin w skałach uporządkowanych geometrycznie w odstępach większych niż kilka centymetrów. Są one jednym z dominujących czynników kontrolujących wzrost szczelin i dlatego muszą być uwzględnione w równaniu konstytutywnym materiału. Przegląd badań z ostatnich dziesięcioleci wskazuje, że nie było jak dotąd, komercyjnego oprogramowania które mogłoby symulować w trój-wymiarze skały warstwowe zawierające systemy spękań. Raport o obecnym stanie wiedzy [2<sup>1</sup>] pokazuje obszary które powinny zostać usprawnione w dostępnych narzędziach symulacyjnych:

- Jeśli wzrost szczelin jest zdominowany przez czynniki trójwymiarowe, konieczne jest użycie modeli wzrostu i orientacji szczelin biorących pod uwagę charakterystykę mechaniczną skały w przestrzeni
- Wzrost szczeliny poprzez warstwy a także wzdłuż jak i w poprzek ich granic nie jest dobrze poznany i w większości aktualnych modeli nie jest poprawnie opisywany.
- Główne parametry fizyczne dla opisu wzrostu szczelin to pierwotne naprężenia skał, prawidłowe ciśnienie medium wewnątrz porów, parametry naturalnych sił zamykających szczeliny oraz własności mechaniczne skały, w tym jej sztywność, lokalny system ciosów i wartości wytrzymałości.

Z powyższych powodów model 3D musi uwzględniać co najmniej trzy główne zjawiska fizyczne:

- ponowne otwieranie systemu spękań
- przepływ płynu w powstałym systemie spękań
- zmiana przepuszczalności symulowanej objętości skał

## **Jak radzić sobie z niepewnością dotyczącą parametrów złoża?**

Oprócz odpowiedniego oprogramowania do symulacji szczelinowania hydraulicznego kolejnym wyzwaniem jest prawdopodobieństwo wartości parametrów rezerwuaru takich jak własności gruntu lub wymiary warstw geologicznych. Nawet w przypadku dobrze przebadanego złoża, wiele spośród wartości parametrów cechuje znaczna niepewność lub wręcz trzeba ich szukać w literaturze lub bazować na doświadczeniu. Wymagane jest więc przeprowadzenie analizy wrażliwości w celu identyfikacji najważniejszych parametrów wejściowych oraz ich kalibracji modelu numerycznego względem danych eksperymentalnych. Do tego celu stworzono przez firmę Dynardo narzędzie optiSLang [2] za pomocą którego realizowana jest kalibracja modelu złoża oraz następnie optymalizacja produkcji gazu. Narzędzie optiSLang zarządza i przetwarza szereg numerycznych badań wrażliwości układu, wybierając próbki na podstawie zoptymalizowanej stochastycznej strategii wielowymiarowych sześcianów łańcuchowych. Wykorzystany jest również statystyczny pomiar

współczynników wagi, który służy wybraniu najistotniejszych spośród parametrów stochastycznych modelu. Następnie proces kalibracji i optymalizacja oparte są tylko na tych istotnych parametrach. Więcej szczegółów na temat algorytmów można znaleźć w dokumentacji oprogramowania [2] lub w artykułach dotyczących kalibracji i optymalizacji modeli numerycznych CAE [3,4, 5].

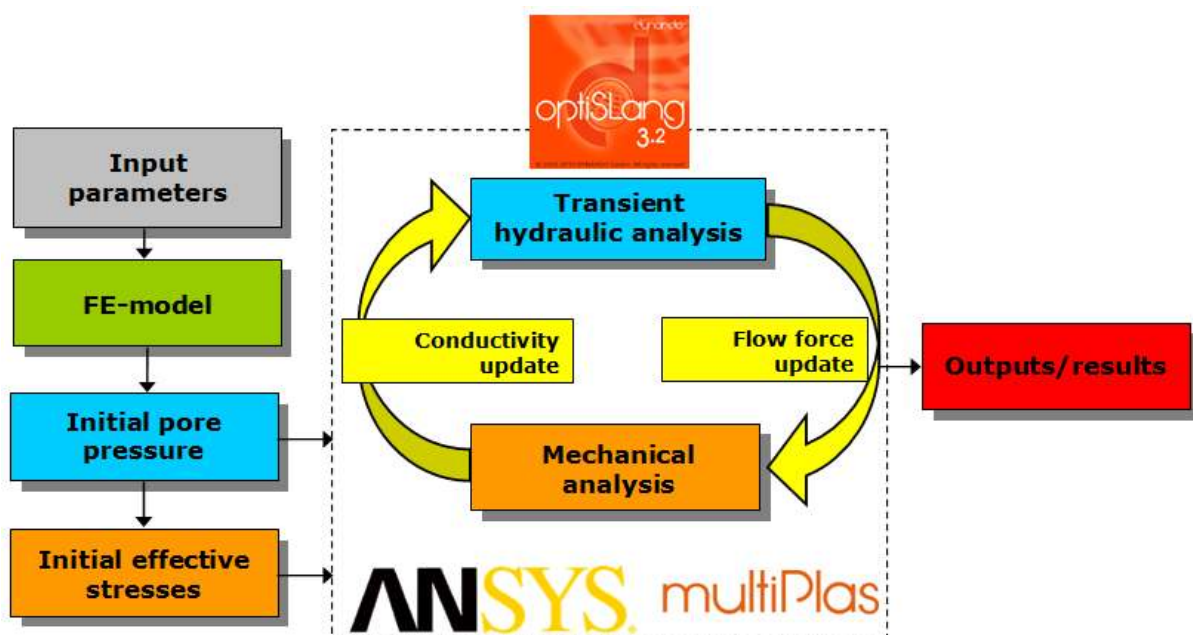
W przypadku przeprowadzonych analiz dla złóż Burnett w Teksasie, zidentyfikowano około 200 parametrów probabilistycznych. W takim przypadku stanęliśmy przed wyzwaniem określenia kilku najważniejszych spośród wielu o niepewnej lub nieznannej wartości. Główne dane w przypadku badania wrażliwości to dolne i górne granice dla każdego niepewnego parametru. W ramach tych granic, optiSLang tworzy próbkę możliwych konfiguracji projektowych a automatyczny proces oceny służy do generowania i oszacowania każdej konfiguracji projektu. Organizacja symulacji w optiSLang obejmuje automatyczną aktualizację geometrii złoża, automatyczne tworzenie siatki numerycznej, obliczenia i pobranie wyników.

Używając takiego podejścia, można automatycznie zidentyfikować kluczowe parametry, zweryfikować i pogłębić wiedzę o głównych zjawiskach fizycznych i skonfigurować bazę dla udanej kalibracji modelu.

## **Model hydraulicznego szczelinowania 3D**

Do efektywnego modelowania, symulacji oraz obróbki wyników (postprocessingu) wybrano oprogramowanie firmy ANSYS Inc., umożliwiające rozwiązanie dowolnego zagadnienia brzegowego metodą elementów skończonych. Poniżej przedstawione zostały istotne informacje o przeprowadzonej symulacji.

Na początku, zgodnie z zadanymi parametrami wejściowymi, automatycznie generowana jest geometria złoża a na jej podstawie sześciocienna siatka numeryczna. Aby uchwycić anizotropowość układu, pojedyncze warstwy złoża są inicjowane oddzielnie i zespolone za pomocą kontaktu. Następnie rozpoczyna się nieliniowa analiza uwzględniająca historię obciążenia z szybu poprzedzone inicjalizacją ciśnienia wewnątrz porów oraz naprężeń skał. Po kroku mechanicznym następuje analiza przepływu płynu szczelinującego. Za sprawą integracji symulacji i procesu kalibracji, pełna symulacja w tym generacja geometrii, siatka i symulacja hydraulicznego szczelinowania jest zautomatyzowana a wszystkie niepewności można sparametryzować (patrz rysunek poniżej). Parametry spękanych skał zawierają odkształcenia, siły i warunki przepływu płynu. Parametry geometryczne zawierają niepewność grubości warstwy oraz pozycji odwiertu. Zjawisko szczelinowania hydraulicznego jest symulowane za pomocą analizy przepływu płynu dla uchwycenia zmiany ciśnienia w powstałych porach będącego rezultatem wtrysku wody w połączeniu z wzrostem szczelin. Dla opisu przepływu w systemach spękań jak również dla pęknięcia i ponownego otwierania układu ciosów użyte zostało podejście bazujące na mechanice kontinuum [6]. W odróżnieniu od modeli dyskretnych pęknięć, zastosowane podejście umożliwia inżynierską analizę wielokilometrowych obszarów w uzasadnionym ekonomicznie czasie.



Rysunek 1. Przepływ informacji w trakcie symulacji

Zwróćmy uwagę, że dla przemysłowego zastosowania przedstawionej metodologii potrzebne jest by oprogramowanie wyposażone było w potężne możliwości parametrycznego modelowania. Przydatnymi cechami są tworzenie wysokiej jakości siatek, analiza kontaktu i sprzężenia między analizą mechaniczną oraz mechaniki płynu jak również programowalna obróbka wyników. Aby możliwe było optymalizowanie projektu wydobywania, wymagane jest przeprowadzenie analiz nawet setek wariantów, z tego powodu symulacja musi być skuteczna i szybka. Dlatego wybrane oprogramowanie musi udostępniać możliwość obliczeń równoległych, HPC. Z powyższych właśnie powodów do wykonania symulacji wybrano ANSYS.

## Model mechaniczny

Dla opisu przemieszczeń i odkształceń skały zastosowano podejście mechaniki kontinuum w którym położenie dyskretnych pęknięć jest rozmyte. Model zakłada kompozycję tensora odkształcenia z sztywności skał oraz systemu spękań. Relacja naprężenie-odkształcenie jest dana zależnością:

$$\sigma = D_{RM} (\varepsilon^{tot} - \varepsilon^{pl})$$

Gdzie  $D_{RM}$  oznacza macierz deformacji górotworu, składająca się z sztywności skały oraz systemu ciosów

$$D_{RM} = D_R + D_J$$

Konstitutywny model materiału sprężysto-plastycznego opisany jest za pomocą naprężeń efektywnych w postaci:

$$\sigma_{tot} = \sigma_{eff} + np$$

Gdzie  $n$  oznacza wektor udziału w postaci  $n = (1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)^T$ , natomiast  $p$  jest ciśnieniem wewnętrznym porów

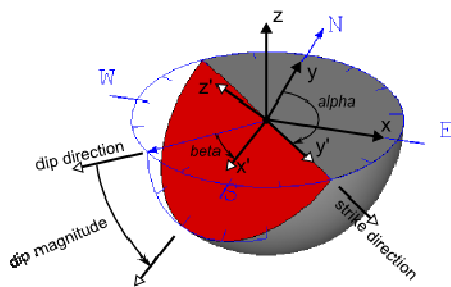
Skąła może ulegać uszkodzeniu na wiele sposobów. Wymagane jest podanie oddzielnych kryteriów na pękanie przy rozciąganiu oraz ścinaniu zarówno dla skały jak i zwartych ciosów. Rozważanie skomplikowanego mechanizmu uszkodzenia możliwe jest dzięki zastosowaniu kompozytowej powierzchni plastycznej. W przestrzeni naprężeń powstaje w ten sposób nieciągła oraz wielopowierzchniowa funkcja płynięcia plastycznego. Algorytm musi radzić sobie z osobliwościami na przecięciu powierzchni dla różnych kryteriów, oraz z tym że w objętości kontrolnej może wystąpić wiele kryteriów jednocześnie [7]. Prowadzi to do rozwiązania układu  $n=j$  równań:

$$\left\{ \frac{\partial F_n}{\partial \sigma} \right\}^T D d\varepsilon = \sum_{j=1}^n \left[ \left\{ \frac{\partial F_n}{\partial \sigma} \right\}^T D \frac{\partial Q_i}{\partial \sigma} - \frac{\partial F_n}{\partial \kappa_n} \frac{\partial \kappa_n}{\partial \lambda_j} \right] d\lambda_j$$

Rozwiązaniem powyższego układu równań jest naprężenie płynięcia. W odróżnieniu jednak od praw plastyczności opartych na pojedynczej powierzchni, przekroczenie kryterium nie jest wystarczającym warunkiem do uruchomienia odkształceń plastycznych we wszystkich schematach uszkodzenia. Kryterium to musi zostać oddzielnie sprawdzone.

$$d\lambda_j \geq 0$$

Zapewnia to że naprężenia zwracane z regionów przecięcia kryteriów mają wartości uzasadnione fizycznie. Opisany model jest częścią biblioteki multiPlas [8]



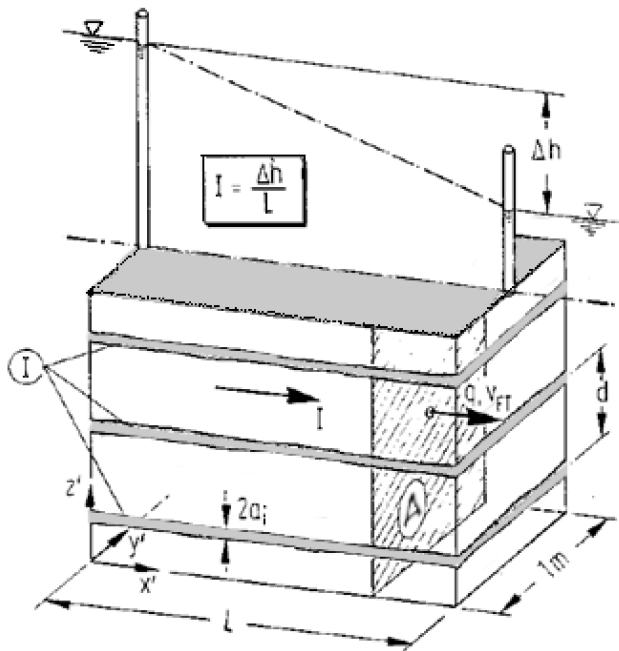
Rysunek 2. Płaszczyzna plastycznego płynięcia

## Model przepływowy

Z powodu bardzo małej przepuszczalności wewnętrznej skały główny przepływ wystąpi w szczelinach. Wynikowa przepuszczalność jest określona przez anizotropowy tensor przepuszczalności ujednocnionej masy skały. Używając sformowania Darcy'ego dla opisu przepływu laminarnego w złożu porowatym, prędkość przepływu w kierunku szczeliny ma wartość

$$V_{FT} = \frac{q}{A} = k_{FT} \frac{2a_i}{d} I$$

Gdzie  $k_{FT}$  jest anizotropową przepuszczalnością w systemie spękań skały,  $a_i$  – rozwarciem szczelin,  $A$  przekrojem,  $d$  – rozstępem szczelin,  $I$  – ciśnieniem hydraulicznym



Rysunek 2. Przepływ informacji w trakcie symulacji [9]

## Sprzężenie efektów

Przepływ płynu powoduje zmianę pola ciśnienia w szczelinach. Wynik ciśnień z każdego inkrementu analizy przepływu jest przenoszony do pola mechanicznego w postaci sił. Wartość tych sił jest analizowana.

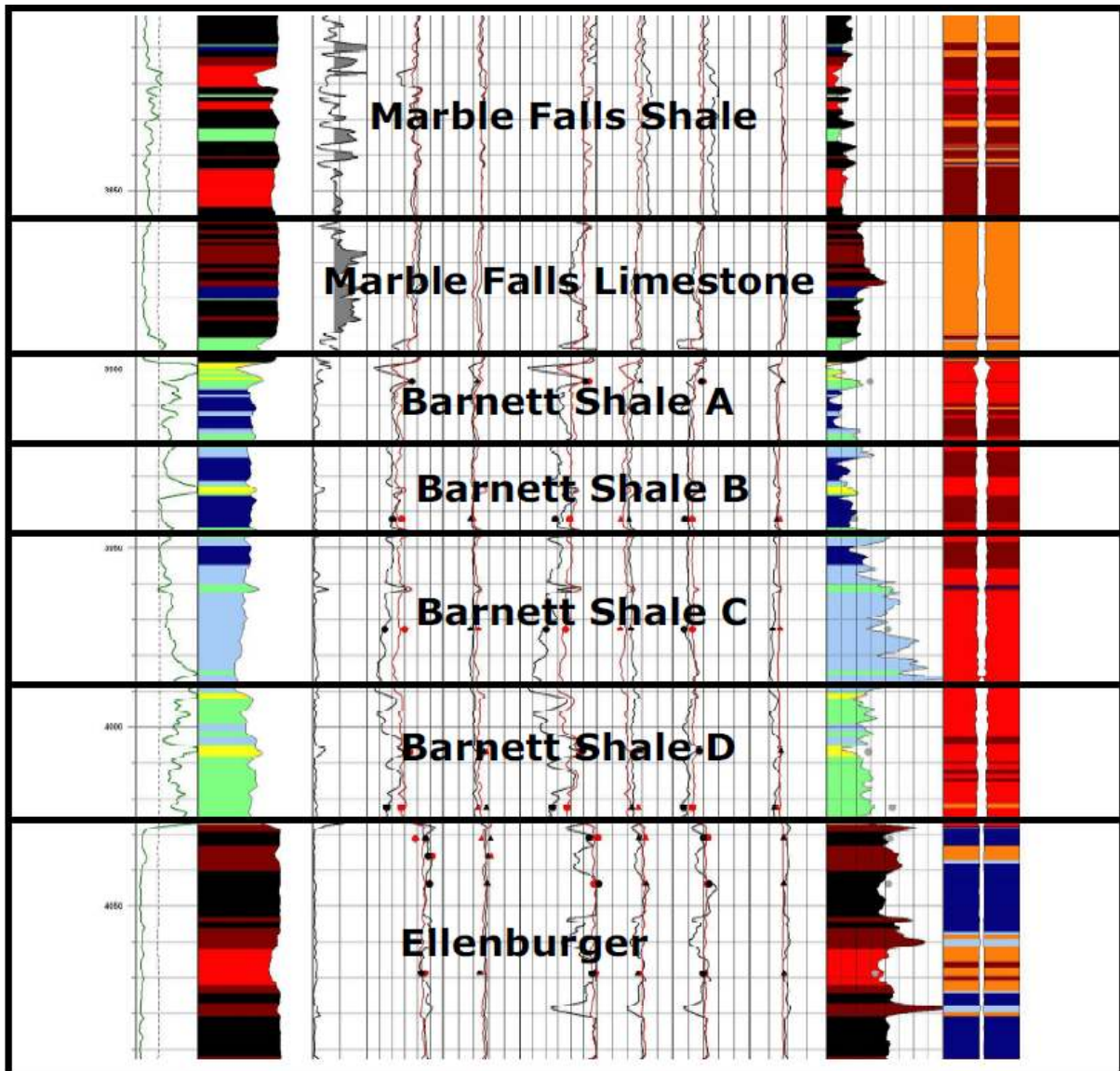
$$\{F_{Str}\} = \gamma_w V_G \{I\}$$

Gdzie  $I$  – ciśnienie w szczelinach skalnych,  $g_w$  – gęstość tłoczonej cieczy przy danym ciśnieniu,  $V_G$  – objętość w którym następuje przepływ.

## Zastosowanie symulacji hydraulicznego szczelinowania w złożu Barnett Shale

### - Modelowanie

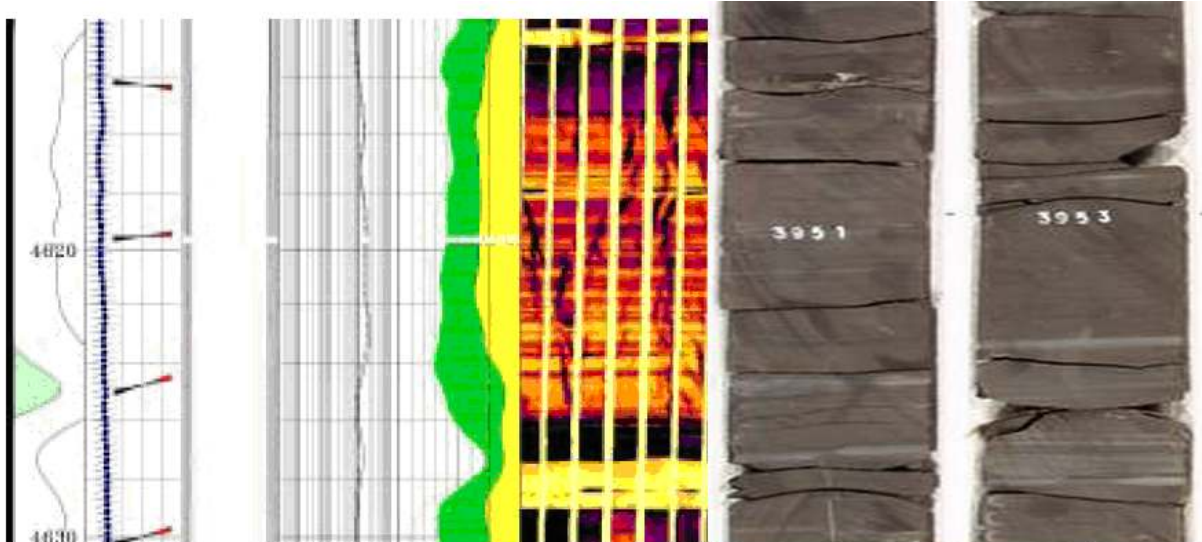
Model został zbudowany i zweryfikowany pod kątem wydobycia gazu w obszarze Barnett Shale w stanie Teksas. Pomiar podstawowe strefy (rys 4) zawierające właściwości warstw skał jak również wyniki testów i pomiarów sejsmicznych (rys 3) zostały udostępnione przez klienta i wykorzystane do budowy oraz kalibracji modelu złoża. Model ten scharakteryzowano przez 7 warstw skalnych oraz 4 systemy anizotropii w każdej z warstw.



Rysunek 3. Wyciąg z sejsmicznych danych pomiarowych dla siedmiu warstw

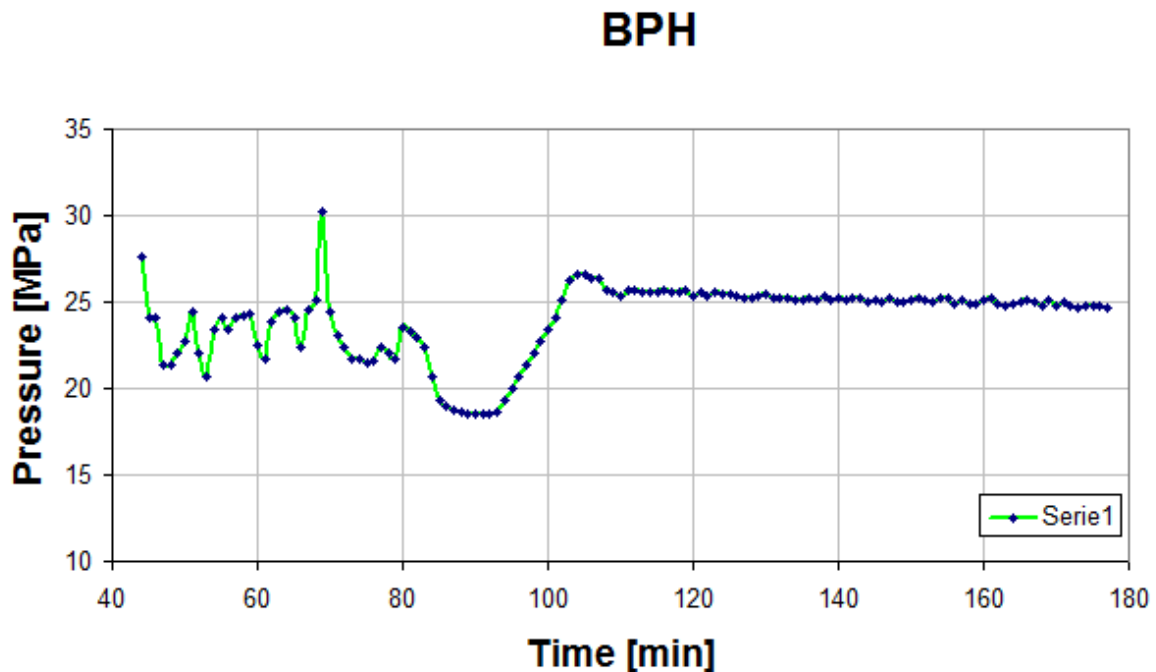
Parametryczny model numeryczny operuje na wymiarach geometrycznych takich jak grubość warstwy, lokalizacja i kształt odwiertu, właściwości materiałowe charakteryzujące odkształcenie, siły i właściwości hydrauliczne oraz parametry samego procesu hydraulicznego szczelinowania.





Rysunek 4. Rysunek po prawej przedstawia wyciąg charakterystyki spękania na głębokości studni, po lewej, widok ułożenia warstw oraz układ ciosów, spękań w skale, po prawej.

Najbardziej znacząca anizotropia spowodowana wystąpieniem płaszczyzn warstwowania łupków. Ponadto, lokalizacja oraz gęstość spękań jak również ich charakterystyka przepuszczalności musiały zostać zdefiniowane w oparciu o wyniki pomiarów podczas wierceń i wydobytego materiału. Z tych informacji wynika położenie kolejnych systemów spękań, powodujących anizotropię. Przyjęto po trzy w każdej z warstw.

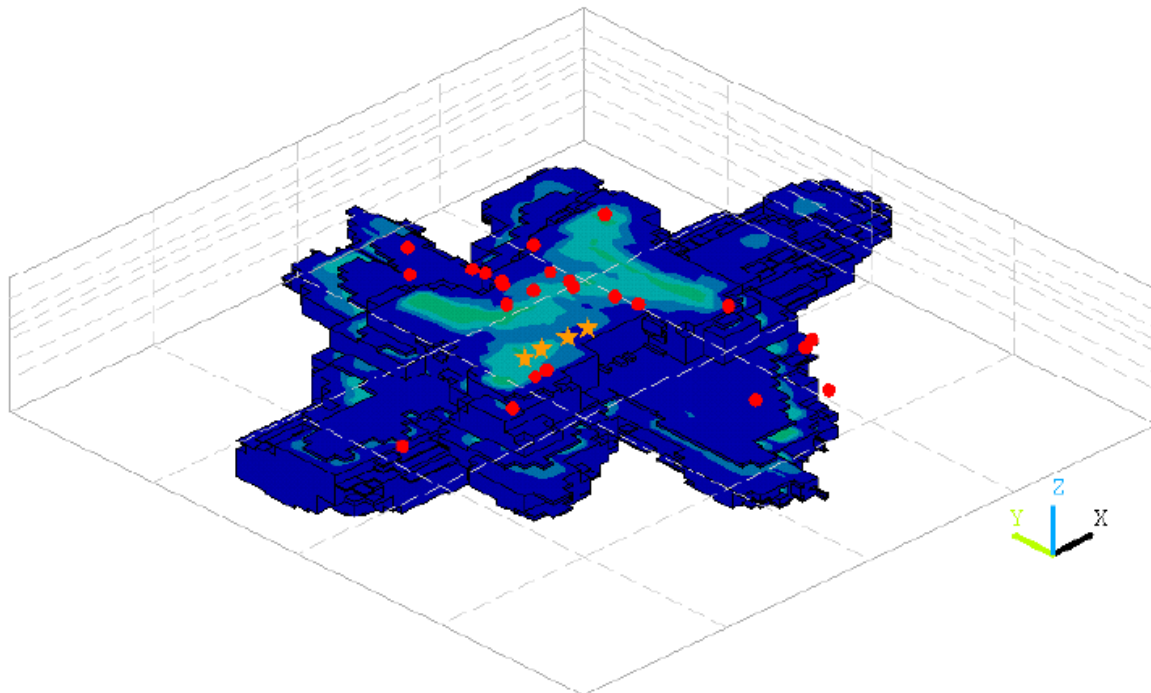


Rysunek 5. Zmiana ciśnienia w czasie szczelinowania

Na stanowisku wydobywania, czas szczelinowania hydraulicznego podzielony jest na 5 etapów trwających po 100 do 200 minut, w których pompuje się ciecz pod zmiennym ciśnieniem (Rys [5]). W symulacji numerycznej przepływu, każdy kolejny krok czasu jest inicjowany ciśnieniem na dnie szybu w odpowiadającej mu chwili procesu.

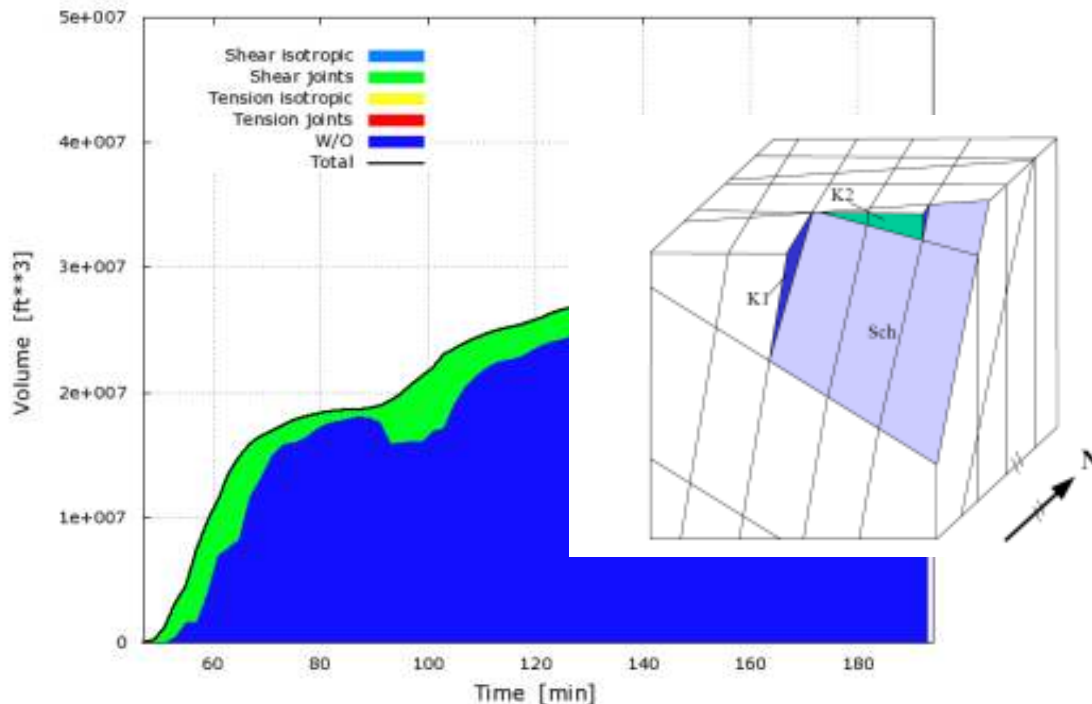


W pierwszej kolejności wykonywana jest symulacja dla wartości średnich wszystkich parametrów. Inicjowane są pola mechaniczne i hydrauliczne a następnie przeprowadzana jest symulacja w czasie pod obciążeniem zmiennym nieliniowo, jak to ma miejsce w rzeczywistości. Głównym wynikiem takiej symulacji jest trójwymiarowa bryła spękaną skały, reprezentowana przez objętość wykazującą odkształcenia plastyczne wynikające ze wzrostu szczeliny. Odkształcenie plastyczne jest w przypadku użytego modelu multiPlas miarą uszkodzenia.



Rysunek 6. Stymulowana objętość łupka po 193 minutach tłoczenia ciśnienia. (niebieski, spękana masa z symulacji, czerwony: odwzorowane pomiary sejsmiczne, gwiazdki: położenie studni)

Bliższe przyjrzenie się zmienności kryterium pęknięcia (rysunek poniżej) wskazuje że wzrost pęknięć zdominowany jest przez ścinanie. Udział uszkodzenia górotworu przez kruszenie oraz rozrywanie jest pomijalnie mały. Z powodu relatywnie większej wytrzymałości skały w porównaniu do wytrzymałości ciosów, takie zachowanie jest do przewidzenia. W rzeczywistości pewne pęknięcia pojawią się również w skale, jednak nie są one do uchwycenia w podejściu homogenicznym. Proszę zauważyć że w zastosowanym podejściu w opisie ujednoczonej objętości, uszkodzenie plastyczne występuje jedynie na froncie pęknięcia. Wewnątrz spękaną skały, ciśnienie gazu uwięzionego we wnętrzu porów wyrównuje się z otoczeniem na skutek czego naprężenia się relaksują. (kolor ciemno niebieski)



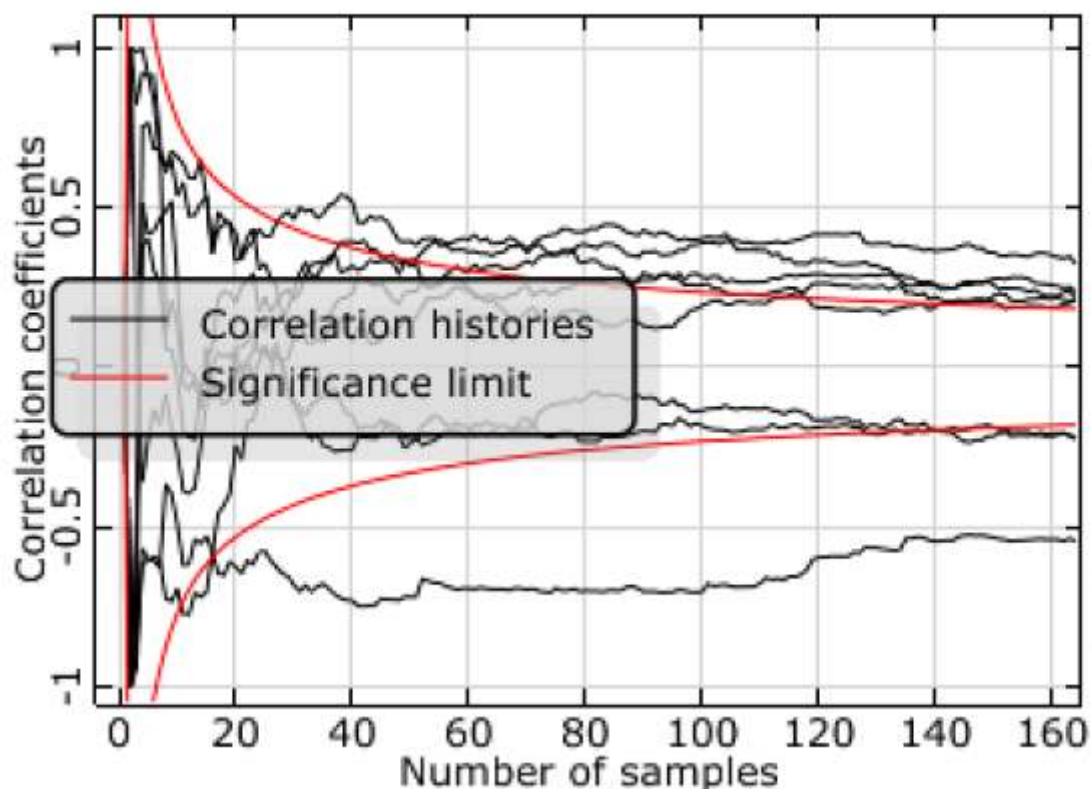
Rysunek 7. Historia aktywności kryteriów wytrzymałościowych wewnątrz skały

## - Kalibracja i optymalizacja

W pierwszej kolejności parametry główne muszą zostać skalibrowane do wyników pomiarów. Najważniejsze spośród nich to wielkość siatki numerycznej, krok czasowy, maksymalna przepuszczalność górotworu oraz współczynniki uwalniania energii opisujący wzrost szczeliny. W tym przypadku jako dane wejściowe mogą być użyte pomiary zebrane podczas samego odwiertu.

Kolejno, przy użyciu optiLang wykonano badanie wrażliwości rozwiązania zbudowanego w ANSYS, modelu na zmianę ponad 200 parametrów projektowych. Analiza ta pozwala na zidentyfikowanie zmiennych kluczowych dla wyników optymalizacji. Najważniejszą informacją dla analizy wrażliwości są dolne i górne granice niepewności. Niestety, granice te nie są dokładnie znane, z tego powodu założono je w oparciu o wszystkie dostępne informacje: pochodzące z badań złoże, z doświadczenia oraz częściowo posiłkując się literaturą. Dodatkowym celem badania jest więc także weryfikacja zakresu niepewności parametrów. Pierwsze przeczescanie przestrzeni parametrów wykazało, że niektóre, dolne granice wartości własności wytrzymałościowych układu są nierealistyczne. Przy zbyt niskich wartościach wytrzymałości nie jest możliwe ustabilizowanie się naprężeń wewnętrznych dla pokładów. Po skorygowaniu granic parametrów, przeprowadzono właściwe testy wrażliwości dobierając kandydatów wg zmodyfikowanej metody sześcianów łacińskich. Symulację prowadzono do momentu aż rezultaty w położeniu punktów pomiarowych nie odbiegały znacznie od wartości z pomiarowych. Poziom istotności zmiennych losowych określony jest miarami statystycznymi jak współczynnik korelacji oraz rangi. Po 162 iteracjach badania wrażliwości zatrzymano. Wartości najważniejszych parametrów osiągnęły poziom powyżej progu istotności.

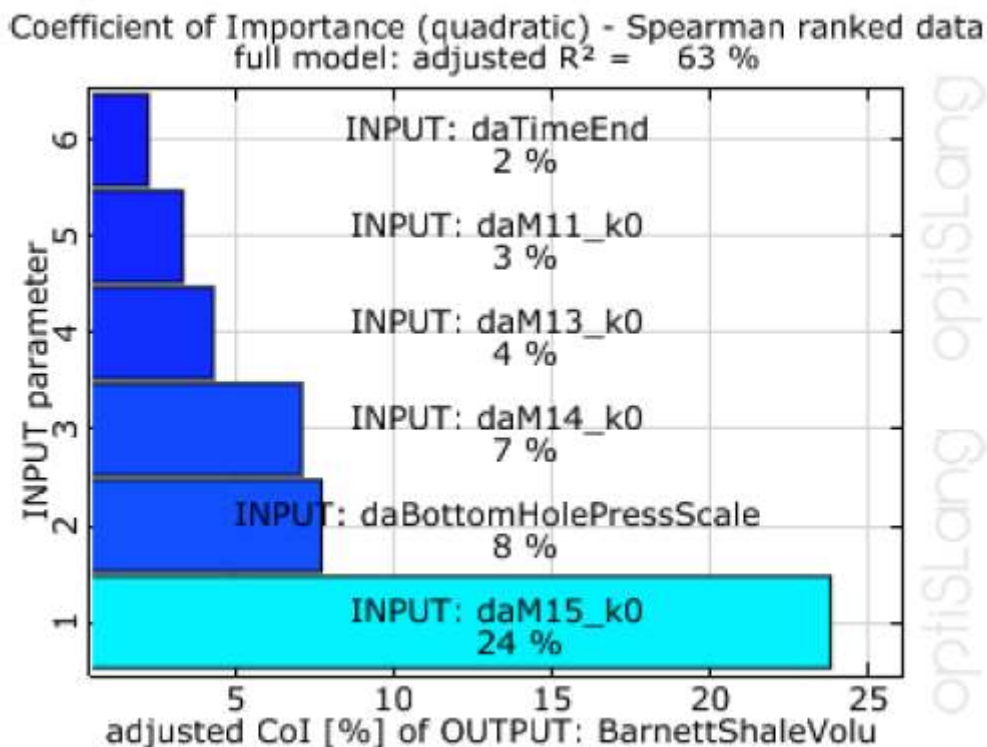
## Linear correlation coefficients



Rysunek 8. Zbieżność wartości współczynników ufności w korelacji

W ten sposób zidentyfikowano zależności dla najważniejszych parametrów wejściowych oraz mechanizmy pozwalające określić prawidłowo odpowiedź rezerwuaru. Skalibrowano model do wyników pomiarowych ustalając wartości parametrów w podprzestrzeni zmiennych początkowych.

Wyniki kalibracji, a przede wszystkim współczynniki korelacji rang Supermana (Col), wskazują że najważniejszym dla wyznaczenia poprawnej objętości stymulowanej skały są wartości naprężeń wewnętrznych warstw skał ( $k_0$ ), poziom efektywnego ciśnienia szczelinowania (daBottomHolePressure) a także całkowity czas procesu (daTimeEnd). Było to oczekiwane gdyż naprężenia wewnętrzne skał określają ciśnienie zamykania szczelin, natomiast wartość ciśnienia szczelinowania kontroluje otwieranie pęknięć. Dla poprawnego określenia wysokości, szerokości i długości spękanej skały stają się istotne również wartości parametrów wytrzymałości ciosów a przede wszystkim kąt wewnętrznego tarcia, kąt dylatacji oraz niektóre dalsze parametry procesu. Oznacza to że objętość spękanej skały jest zależna od całkowitej pracy obciążenia oraz od kierunku wzrostu pęknięć, w pewnym zakresie może jednak być kształtowana przez odpowiedni plan wydobycia.



Rysunek 9. wartości współczynniki korelacji dla najbardziej znaczących parametrów

Po przeanalizowaniu zależności pomiędzy parametrami zbadano potencjał wydobywczy. W tym celu użyto porównania wyznaczonej symulacyjnie objętości oraz historii 6 miesięcznego wydobycia gazu z pola Burnett z 2008 roku. Pozytywnym zaskoczeniem jest wysoka zgodność wyznaczonej wydajności pola z uzyskaną rzeczywistość. Co więcej, wartość była większa niż otrzymana za pomocą analizy suchych badań sejsmicznych. Powodem wyższej zgodności jest wyższa dokładność odwzorowania skomplikowanej przestrzennej bryły stymulowanej skały, która jest możliwa jedynie za pomocą analizy numerycznej.

Zrozumienie wpływu parametrów umożliwiło sprawdzenie potencjału optymalizacyjnego dla rezerwuaru. Po przeprowadzeniu jedynie analizy położenia odwiertu poziomego wskazano możliwość 25% zwiększenia produkcji gazu.

## Podsumowanie i dalsze perspektywy

Za pomocą oprogramowania ANSYS i multiPlas, został stworzony trójwymiarowe, parametryczny symulator hydraulicznego szczelinowania, który może być skalibrowany do pomiarów sejsmicznych i realnej produkcji gazu z studni wydobywczych. Wysoka efektywność numeryczna modelu jest absolutną koniecznością dla kalibracji symulacji szczelinowania hydraulicznego z wykorzystaniem modeli przestrzennych. Aby osiągnąć taką efektywność, w modelowaniu numerycznym skoncentrowano się tylko na głównych efektach fizycznych, czyli interakcji pomiędzy wzrostem szczeliny modelowanej za pomocą wielokierunkowej plastyczności oraz i wzrostem przepuszczalności, połączonych z uproszczonym modelowaniem przepływu w szczelinach złoża. Duża zgodność wyników symulacji i pomiarów wskazuje że dla poprawnej symulacji objętości wystarczy uwzględnienie anizotropowych parametrów wytrzymałości. Przyjęte w modelu pominięcie lokalnych silnie nieliniowych efektów przepływowych oraz dyskretnej mechaniki pęknięcia skał nie wpływa znacznie na uzyskane wyniki.

Niezależnie od użytego oprogramowania, funkcjonalność optiSLang może być wykorzystana w analizie wrażliwości i przy kalibracji kompleksowego modelu złoża. Z powodu trudności weryfikacyjnych których następuje sytuacja geologiczna, (czyli niemożliwości jednoznacznego sprawdzenia) kroki te są wymagane w podczas każdej obróbki danych geosejsmicznych, a zwłaszcza podczas modelowania i optymalizacji wydobycia gazu łupkowego.

Zaawansowane funkcje pakietu ANSYS do analizy mechanicznej i przepływu płynu dają możliwość wprowadzenia i analizy dodatkowych efektów fizycznych. Trwają prace nad bardziej skomplikowanym modelem, uwzględniającym wpływ efektów sprzężenia odkształceń termicznych, sprężystych i pochodzących od pełzania na tensor przepuszczalności. Wymienione zjawiska są istotne w przypadku alternatywnych zastosowań szczelinowania, gdy efekty termiczne nie mogą zostać pominięte. Przykładem może być szczelinowanie w celu składowania odpadów radioaktywnych jak również szczelinowanie studni elektrowni geotermalnych.

- 
- 1.) Weijers, L.: Evaluation of Oil Industry Stimulation Practices for Engineered Geothermal Systems, Report DOE-PS36-04GO94001 from Pinnacle Technologies ,October 2007
  - 2.) optiSLang – the optimizing Structural Language version 3.0.1, DYNARDO GmbH, Weimar, 2009, [www.dynardo.de](http://www.dynardo.de)
  - 3.) Thomas Most, Johannes Will (DYNARDO),Recent advances in metamodels of optimized prognosis (MoP), Weimar, 2010.
  4. ) Thomas Lehnhäuser (ANSYS Germany), Norman Henkel, Hans-Joachim Neubauer (BMW AG), Stephan Blum (DYNARDO GmbH), Optimization of process parameters of automotive virtual painting application, 2009
  5. ) Robert Mazur (MESco), Optymalizacja w opraciu o CAE, Programy Inżynierskie, wydanie 4, 2009
  - 6.) Will, J.: Dissertation Beitrag zur Standsicherheitsberechnung im geklüfteten Fels in der Kontinuums- und Diskontinuumsmechanik unter Verwendung im-pliziter und expliziter Berechnungsstrategien, Berichte des Institutes für Strukturmechanik 2/99, Bauhaus Universität Weimar, 1999
  - 7.) Will, J.: Variation Analysis as Contribution to the Assurance of Reliable Prog-noses in Virtual Product Development, Proceeding NAFEMS Seminar “Reliable Use of Numerical Methods in Upfront Simulations” March 2007, Wiesbaden, Germany, [www.dynardo.de](http://www.dynardo.de)
  - 8.) multiPlas – elastoplastic material models for ANSYS, version 6.0, DY-NARDO GmbH, Weimar, 2009, [www.dynardo.de](http://www.dynardo.de)
  - 9.) Wittke, W.: Rock Mechanics, Theory and Application with Case Histories, Springer, 1990