

Modelowanie powierzchni z wykorzystaniem programu Petrel

II. Podstawowe algorytmy estymujące

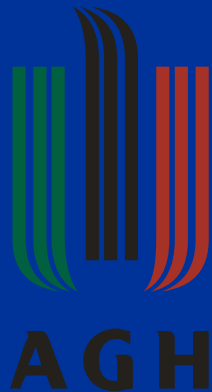
Bartosz Papiernik

Współpraca Grzegorz Machowski

Katedra Surowców Energetycznych

Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska

Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie



KRAKÓW
Kwiecień 2008



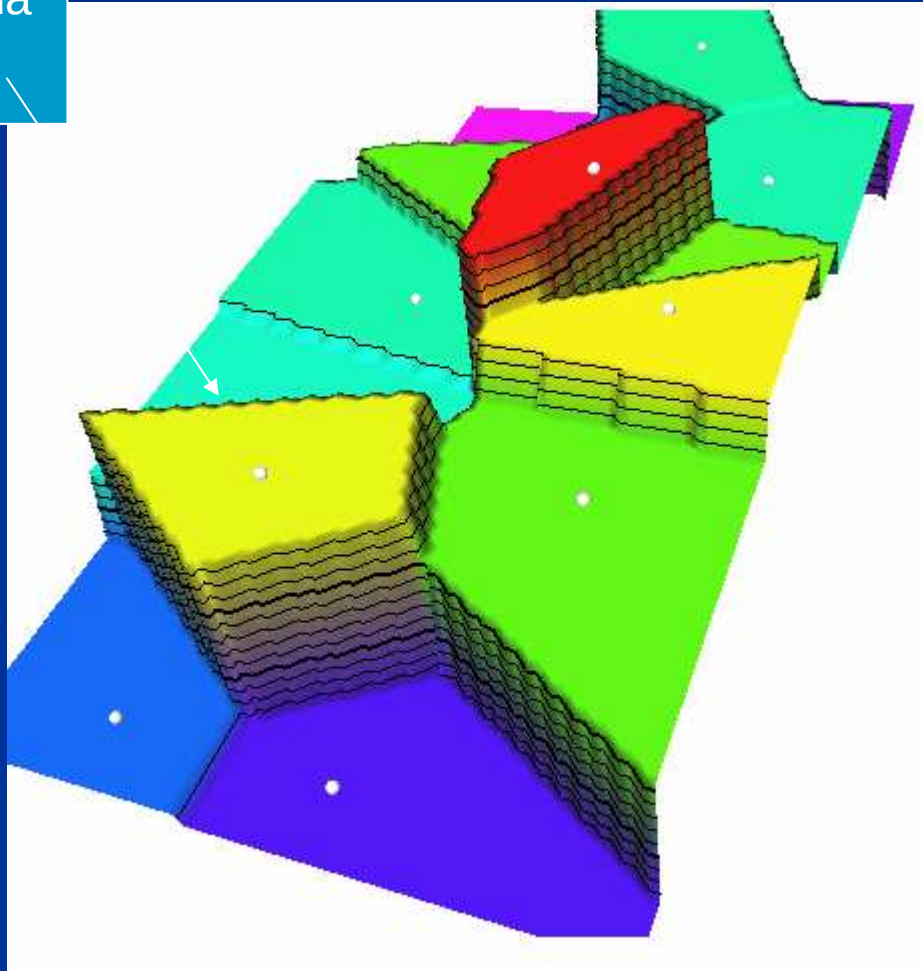
Do opracowania wykładu wykorzystano fragmenty przygotowywanej pracy doktorskiej autora

W partiach dotyczących zastosowania programu Petrel wykorzystano rysunki pochodzące z elektronicznej pomocy programu Petrel2007
Wykorzystywane do przygotowania wykładu programy Petrel 2007, Eclipse 100, zostały przekazane na WGGiOŚ AGH jako darowizna przez firmę Schlumberger Logelco Inc.

Materiały nie mogą być powielane bez zgody autora

Closest point (Closest) dzieli przestrzeń na strefy bezpośredniego wpływu danej wejściowej.

Poligony Van Thyssena
(Woronoia)

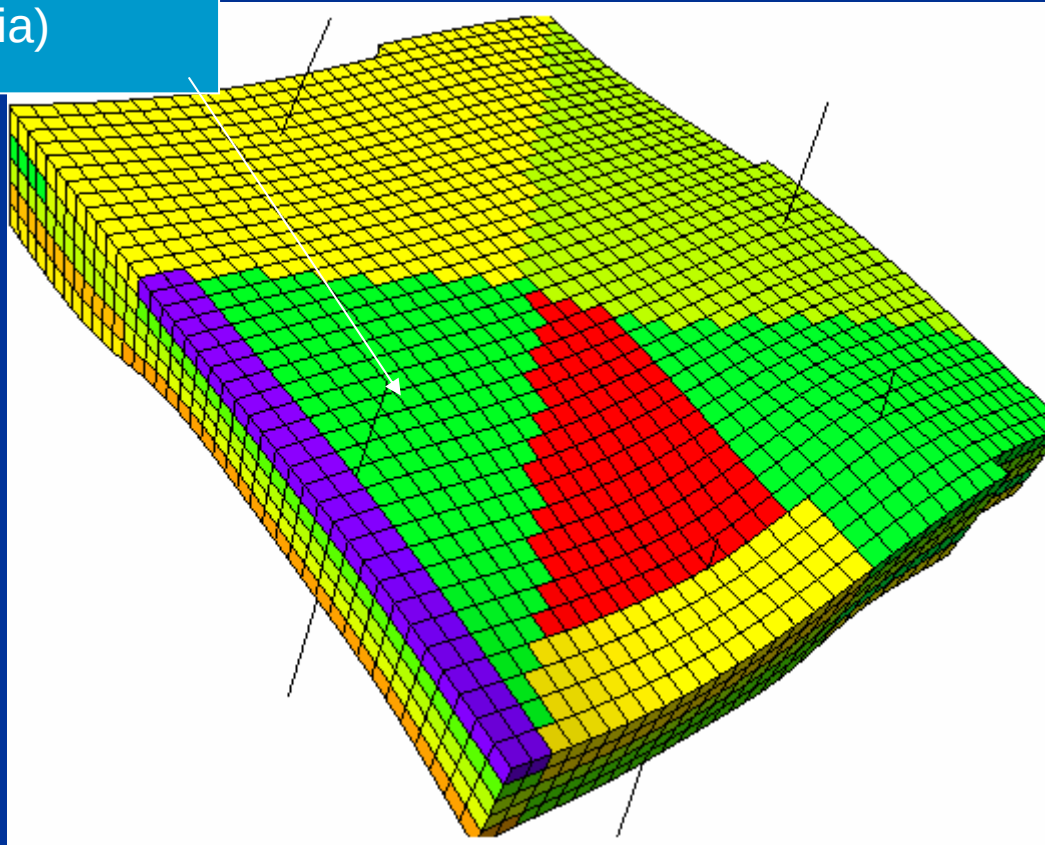


Ćwiczenie 1. Algorytm Assign Closest Point oraz wykorzystanie zakładki **Well adjustment** oraz **Post Processing**

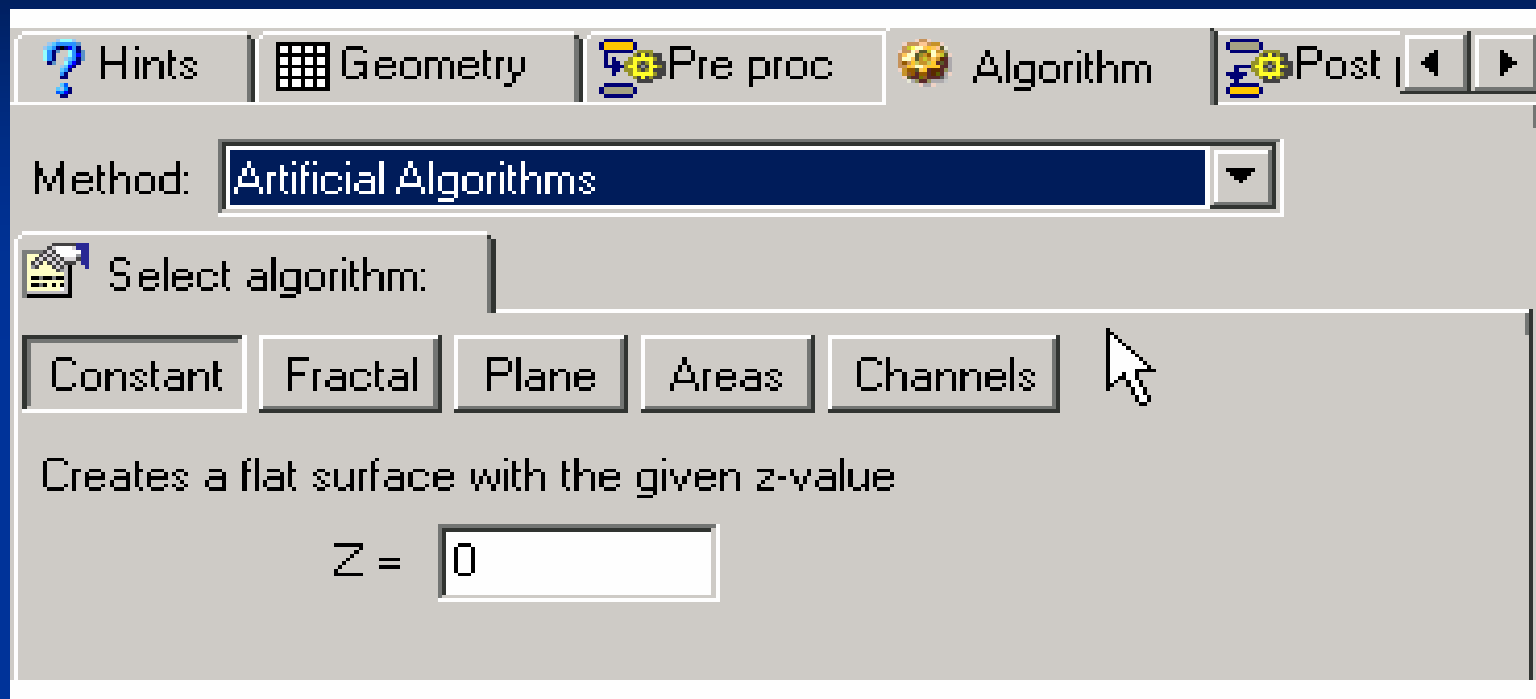
- Dla stropu cenomanu (dane typu *Well Tops: Cenoman.csv*) w domenie głębokościowej lub czasowej i uskoków *USKOKI-CENOMAN.DAT* policzyć grida wykorzystując algorytm **Assign to closest point**
- A) Policz siatkę dla ustawień standardowych
- B) Policz siatkę ponownie, ustawiając silną anioztropię
- C) Pozostaw ustawienia z punktu B) ale w zakładce **Well adjustment** wybierz punkty *Cenoman.csv* (Z)
- Wstępnie dokonaj konwersji Atrybutu Z w pliku *Cenoman.csv* do postaci punktów *Convert to points*)
- D) Pozostaw ustawienia z punktu C i wejdź w zakładkę *Post-processing*
- Ustaw liczbę iteracji na 2 potem na 5 sprawdź rezultaty po każdej zmianie wybierając klawisz *Apply*

Algorytm Closest point (Closest) Jest używany także do opracowania gridów 3D. Technika obliczeniowa jest stosunkowo rzadko używana- głównie do opracowania modeli facjalnych

Poligony Van Thyssena
(Woronoia)



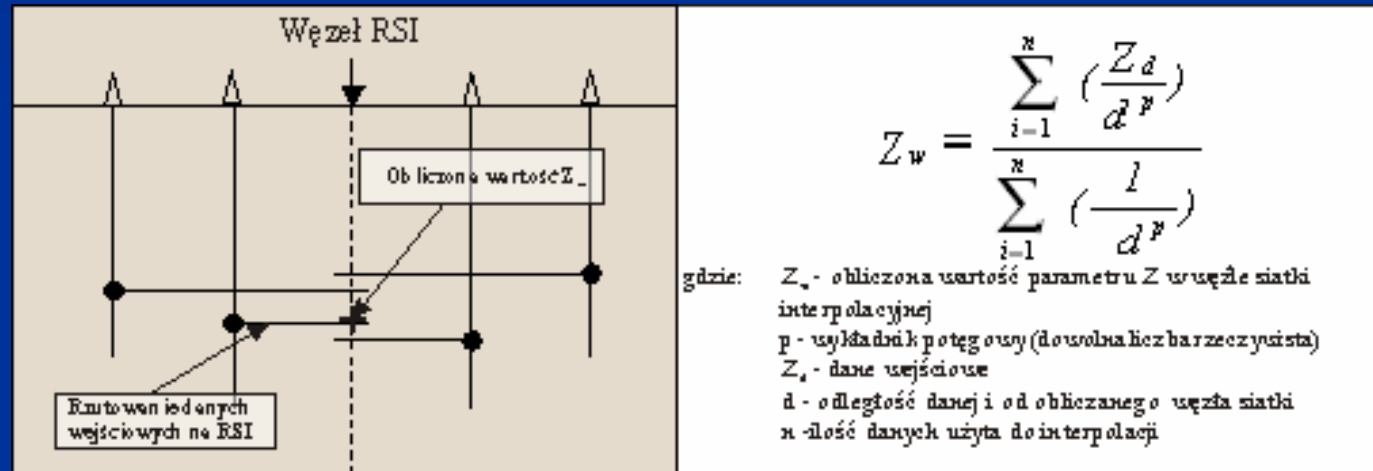
Algorytmy „sztuczne” (*Artificial*) -moduł *Make Surface*



- Stała
- Obliczenie powierzchni przybliżonej fraktalami
- Obliczenie płaszczyzny o arbitralnie określonym kącie nachylenia (np., model powierzchni depozycyjnej)
- Utworzenie modelu o stałych wartościach Z w obrębie wieloboków (proste modele facjalne)
- Modele kanałów

Algorytm średniej ważonej *Moving Average*

Algorytmy zaliczane do tzw. metod odwrotnej odległości (nazwy spotykane w programach: *Inverse Distance*, *Weighted Average*, *Moving Weighted Average*) należą do najprostszych z pośród stosowanych technik interpolacji numerycznej. Traktują one wszystkie dane z otoczenia estymowanego węzła RSI w identyczny sposób, rzutując ich wartości prostopadle. Czynnikiem różnicującym wpływ punktów na wynik estymacji jest ich oddalenie od węzła RSI, dodatkowo modyfikowane wykładnikiem potęgowym. Algorytmy z tej grupy bazują na podstawowym równaniu przedstawionym na rysunku



Wśród wymienionych parametrów kluczowe znaczenie ma odległość d , która jest odwrotnie proporcjonalna do wagi punktu. Jednakże niezwykle duży wpływ na jakość modelu ma także arbitralnie wyznaczany wykładnik potęgowy p .

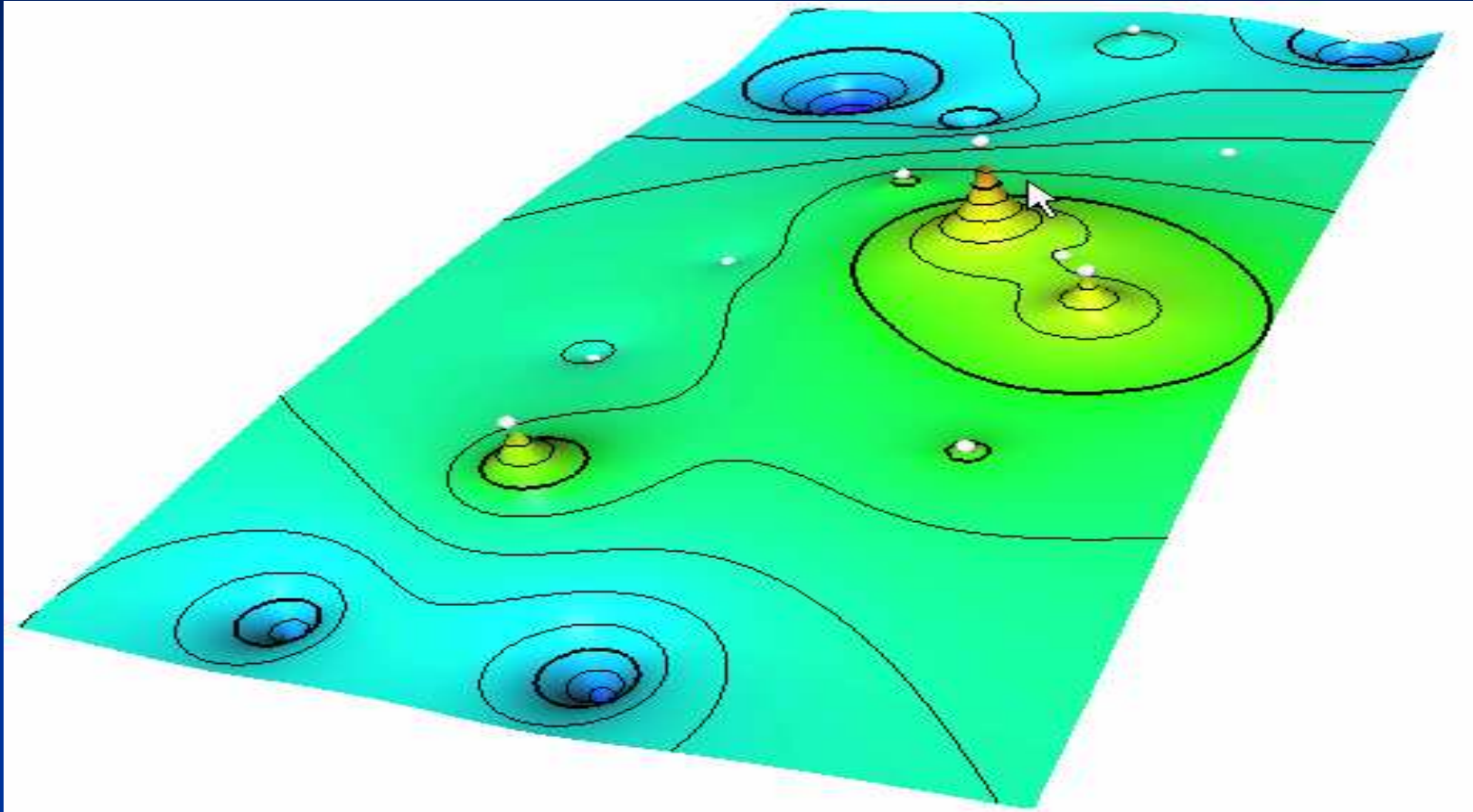
Algorytmy z opisywanej grupy w podstawowej formie nie pozwalają dokonywać ekstrapolacji ekstremów siatki poza wartości danych wejściowych. Z tej przyczyny najlepsze rezultaty można uzyskać kartując parametry zmieniające się w ograniczonym zakresie (np. współczynnik porowatości) na podstawie licznych danych wejściowych.

Ćwiczenie 2. Algorytm *Moving Average*

- Dla stropu cenomanu (dane typu *Well Tops: Cenoman.csv*) w domenie głębokościowej lub czasowej i uskoków *USKOKI-CENOMAN.DAT* policzyć grida wykorzystując algorytm *Moving Average*
- Promień wyszukiwania pozostaw bez zmian
- Policz 4 siatki zmieniając opcje Point Weighting
 - EQUAL
 - *INVERSE DISTACE*
 - *INVERSE DISTACE SUARED*
 - *INVERSE DISTACE QUADUPLED*

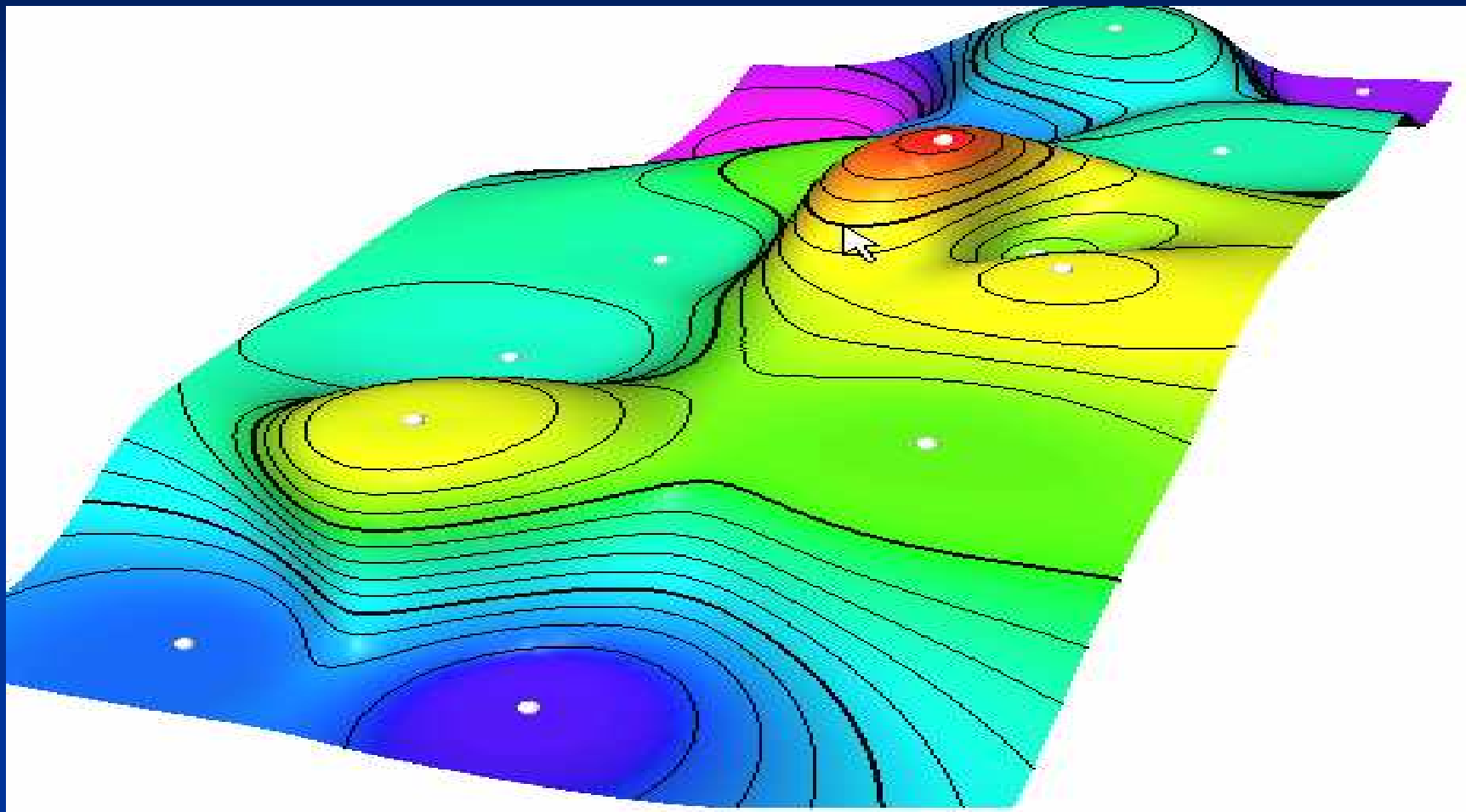
Porównaj wyniki co powoduje zaobserwowana różnicę ?

Algorytm średniej ważonej *Moving Average (MA)*



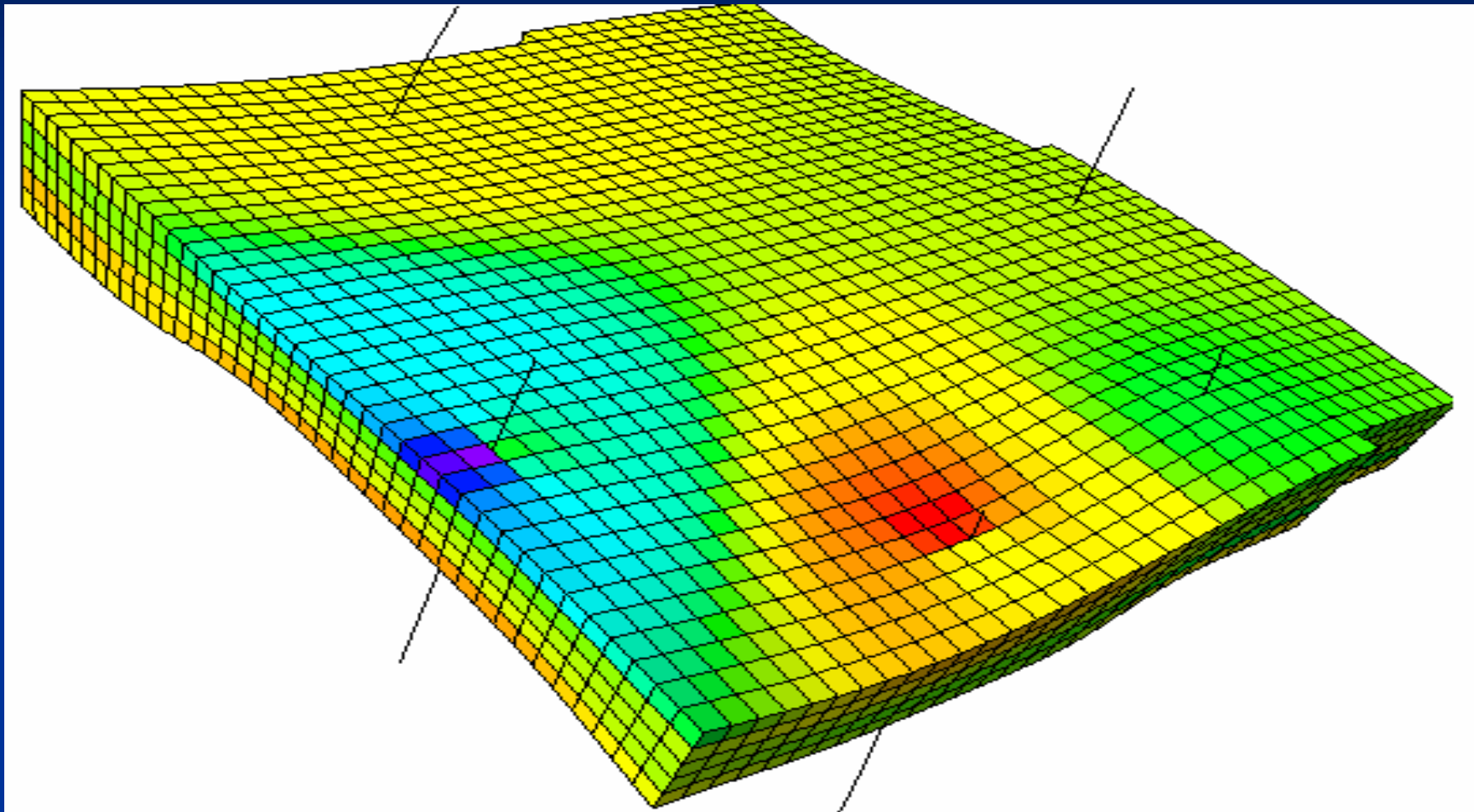
Wynik interpolacji dla $p=1$. Mała przydatność do odtworzenia zjawisk geologicznych. Jakże może mieć zastosowanie tak wykonana mapa ?

Algorytm średniej ważonej *Moving Average*



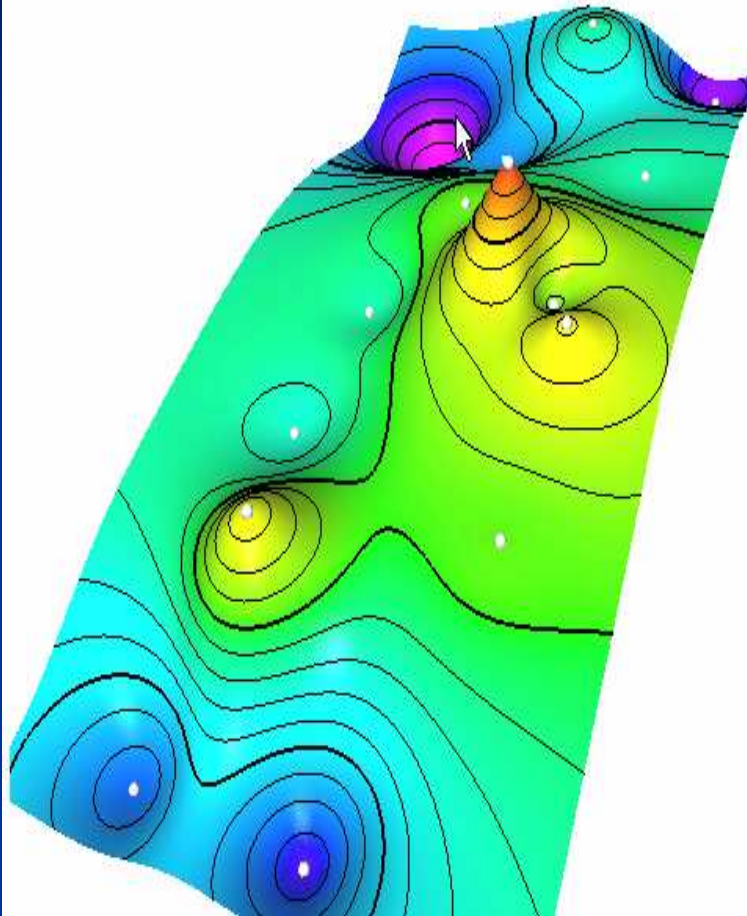
Wykładnik potęgowy = 4 duży wpływ odległych punktów

Algoritm *Moving Average* $p=4$, Grid 3D

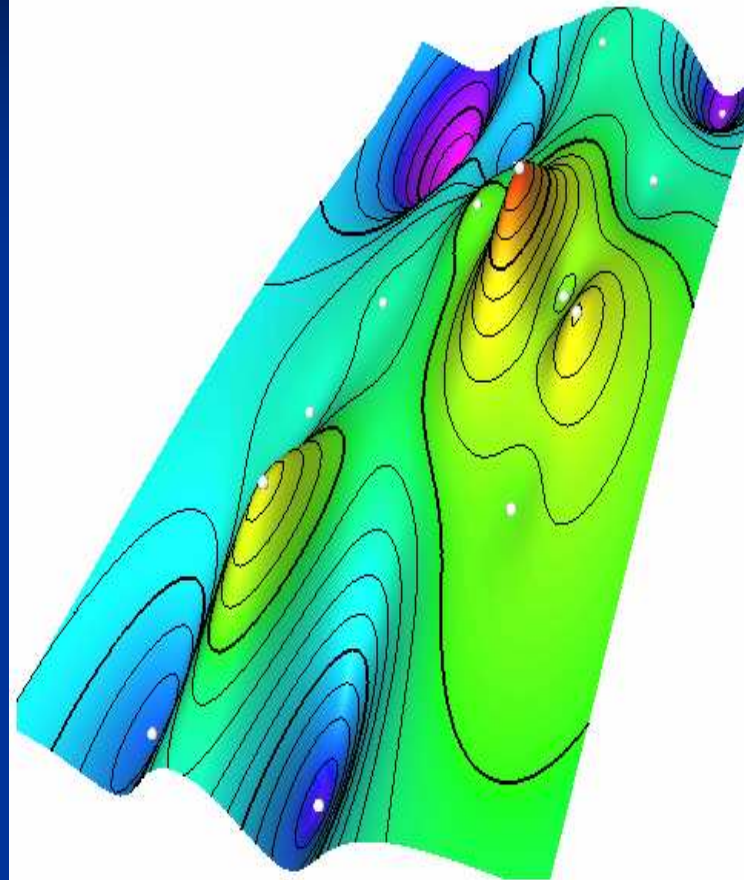


Directional trend (Określanie ważenia kierunkowego)

Directional trend - moving average, exp 2, 0 trend weight 1



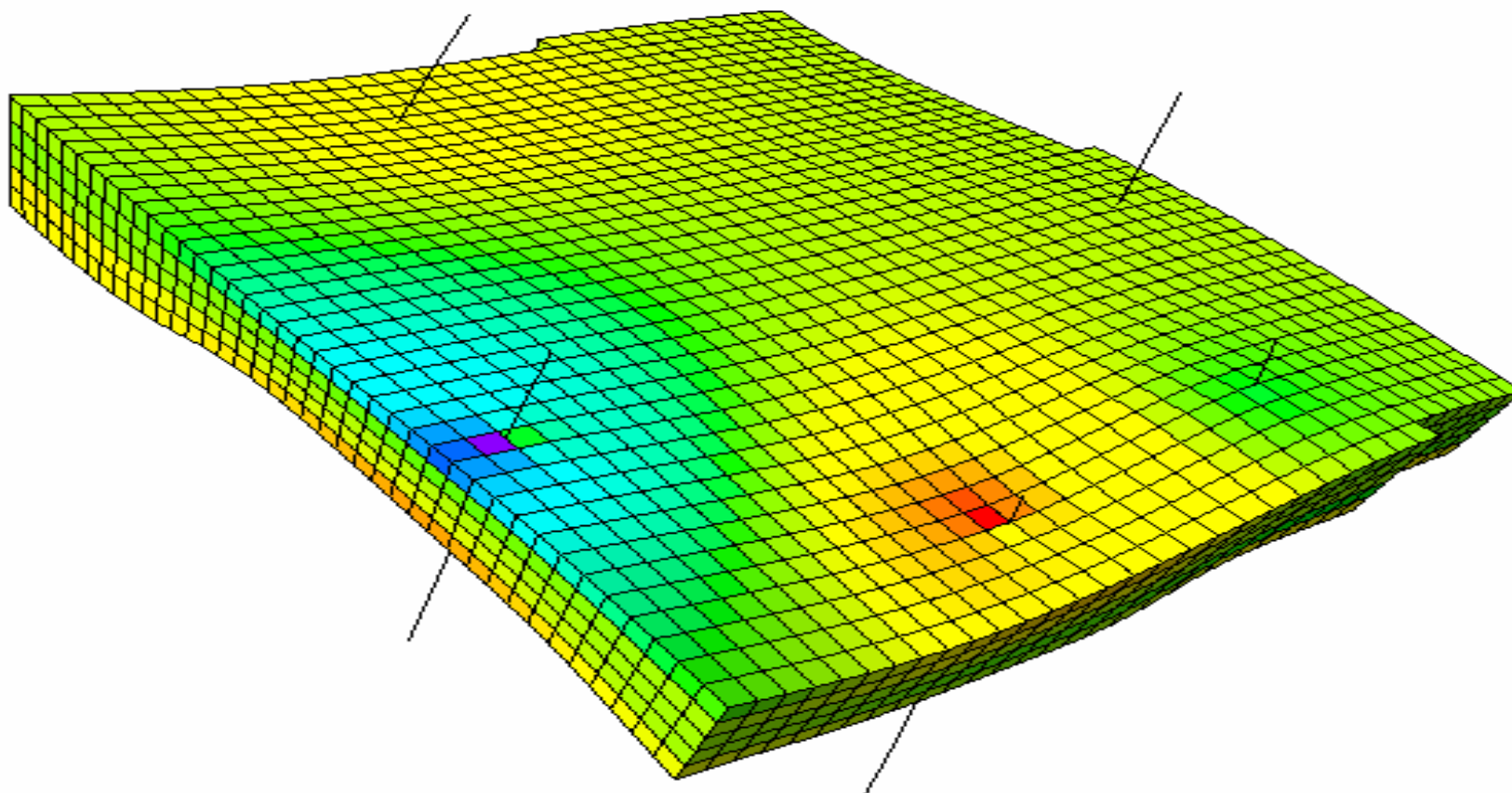
Directional trend - moving average, exp 2, 0 trend weight 3



Uśrednianie pionowe (*Petrophysical modeling*)

W przypadku modelowania petrofizycznego z wykorzystaniem algorytmu MA użytkownik może określić sposób uśredniania pionowego - czy będzie ono przebiegać wzdłuż warstw czy też poziomej płaszczyzny. Dystans, kierunek i siła wpływu pionowego i poziomego mogą być określane w kategoriach odległości bądź ilości węzłów.

Vertical Average - moving average, exp 2, averaging follows layer



Algorytmy wykorzystujące dopasowanie funkcji (*Functional algorithms*)

- Na podstawie danych tworzona jest płaszczyzna najlepszego dopasowania do danych wejściowych. W podstawowej wersji jest ona obliczana z użyciem wszystkich danych (metoda globalna).
- Wyliczone w ten sposób powierzchnie nie są dokładne (*approximate method*). Odzwierciedlają zasadnicze trendy zmienności (tzw. zmienne zregionalizowane). Składowe te powinny być usunięte z danych wejściowych w przypadku wykorzystania krigingu. Statystyczna istotność trendów wielomianowych pozwala określić test F –Snedecora.
- Wyliczone w ten sposób trendy są w Petrelu używane są jako tzw. powierzchnie sterujące w innych algorytmach (np. powierzchnia depozycyjna dla modelu miąższości).
- Algorytmy z tej grupy powinny być używane z ważeniem punktów typu **Equal** ($p=1$), pozwala to określić tzw. zmienną zregionalizowaną (trend) z danych wejściowych..
- Zasadnicze cztery metody dostępne w programie opierają się na następujących funkcjach:
- **Płaszczyzna (*Plane*)** wyliczona w wyniku dopasowanie funkcji

$$Z = ax + by + c$$

- **Płaszczyzna określona jako prostokątna hiperboloida (*Bilinear*)**

$$Z = axy + bx + cy + d$$

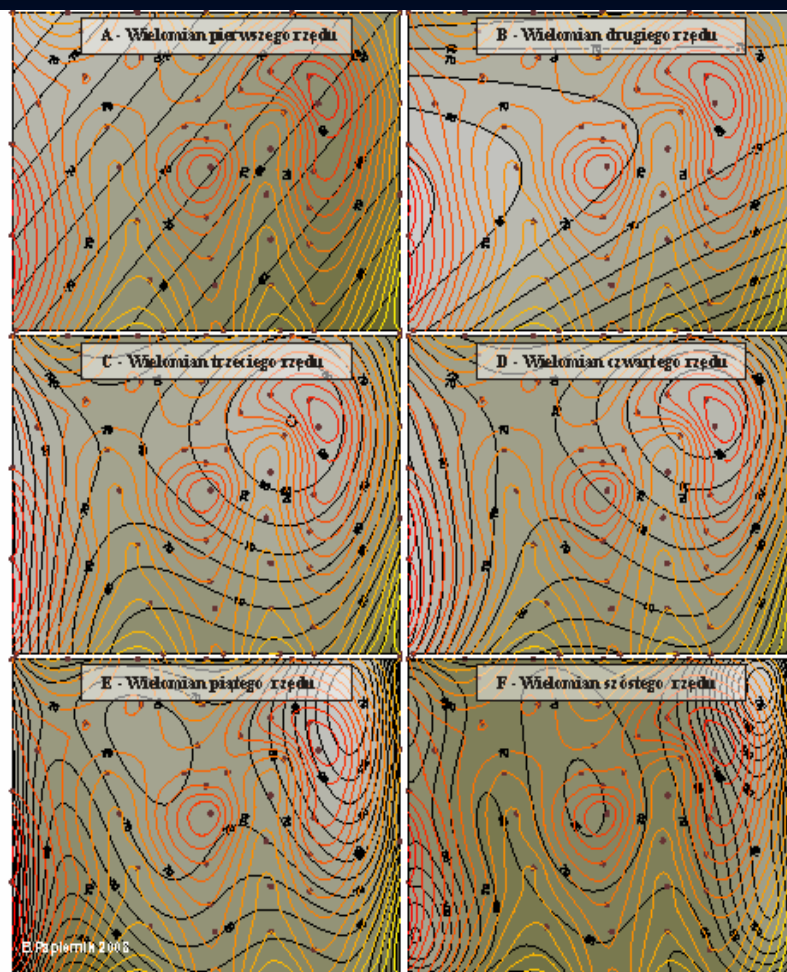
- **Symetryczna parabola (*Simple Parabol*)**

$$Z = a(x^2 + y^2) + bx + cy + d$$

- **Parabola – bez wymuszonej symetrii**

$$Z = ax^2 + by^2 + cx + dy + e$$

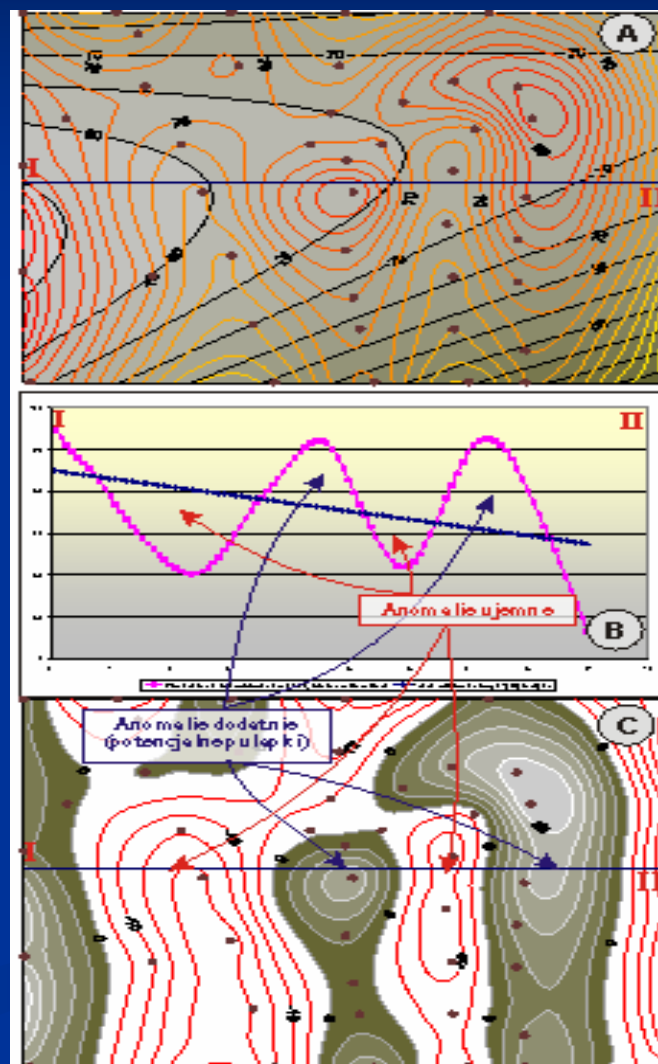
FA nie powinny być stosowane dla zbiorów danych o małej liczebności i nierównomiernej dystrybucji przestrzennej punktów.



Rząd wielomianu	Współczynnik korelacji	Minimalna odchyłka	Maksymalna odchyłka	Suma odchyłek
1-wszy	36.6	-29	38	597
2-gi	62.1	-23	31	536
3-ci	81.1	-21	20	381
4-ty	82.3	-20	23	362
5-ty	87.7	-15	22	313
6-ty	93	-12	17	234

Przykładowe powierzchnie strukturalne modelowane wielomianami rzędu 1 do 6 (A-F; mapy z wypełnieniem barwnym) oraz zestawione dla tych powierzchni współczynniki korelacji modelu z danymi oraz wielkości odchyłek. Na tle powierzchni trendu szarego mapa obliczona algorytmem *Minimum Curvature* (czerwono-żółte izoliny). [Użyto danych demonstracyjnych programu Surfer]

Przykład map obliczonych w wykorzystaniu dopasowania funkcji wielomianowych i obliczone na tej podstawie odchyłki od trendu i współczynniki korelacji



Przykład analizy mapy z zastosowaniem mapy trendu: A) Powierzchnia trendu przybliżona wielomianem 2-giego rzędu

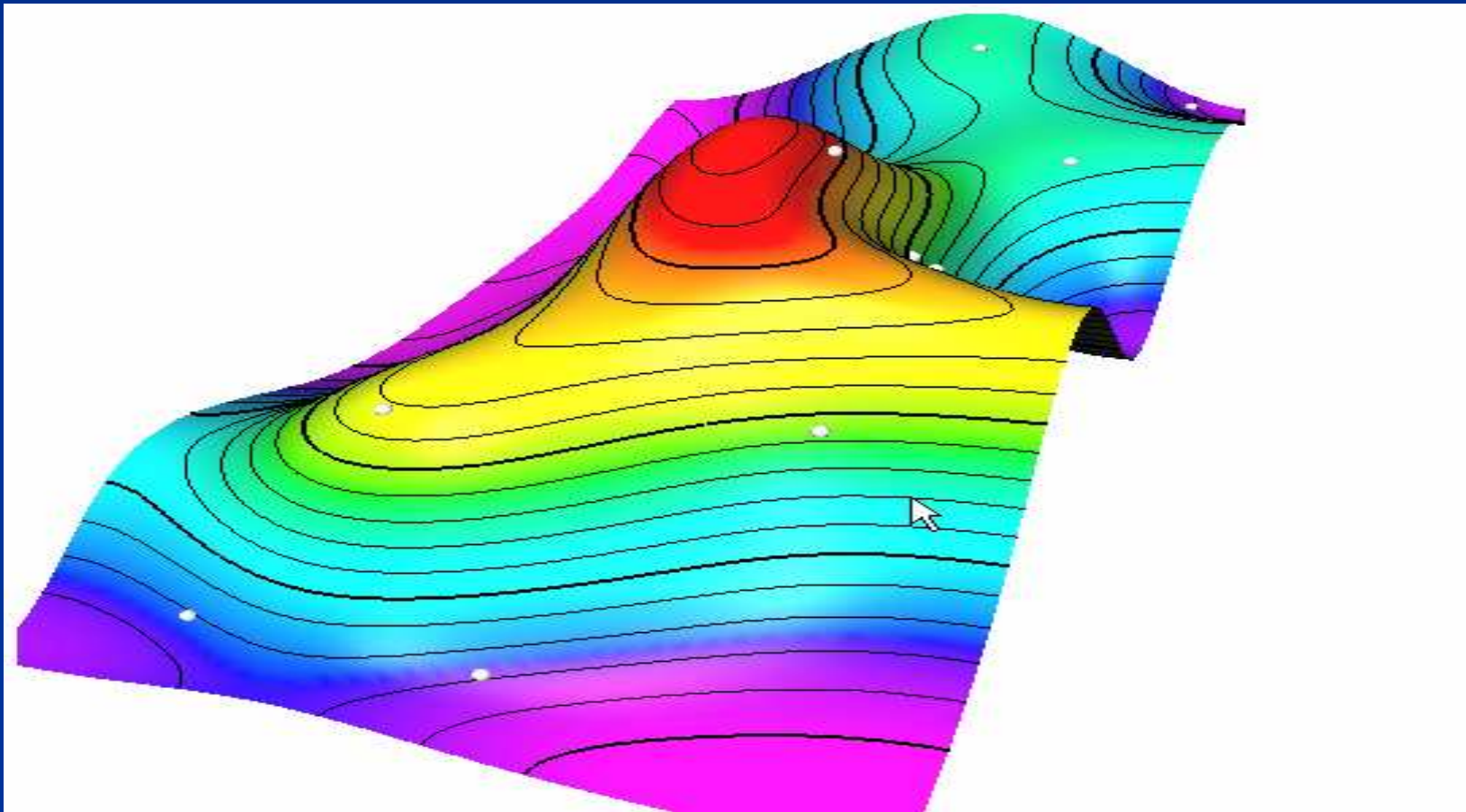
Ćwiczenie 3. Algorytm **Functional** oraz wykorzystanie zakładki **Well adjustment** oraz **PostProcessing**

- Dla stropu cenomanu (dane typu *Well Tops: Cenoman.csv*) w domenie głębokościowej lub czasowej i uskoków *USKOKI-CENOMAN.DAT* policzyć grida wykorzystując algorytm *Functional*
- Policz 4 siatki dopasowując punkty do
 - Płaszczyzna (*Plane*)
 - Płaszczyzna określona jako prostokątna hiperboloida (*Bilinear*)
 - Symetryczna parabola (*Simple Parabol*)
 - Parabol – bez wymuszonej symetrii
- opcje Point Weighting ustaw jako
 - EQUAL
 - *INVERSE DISTANCE SQUARED*

Porównaj wyniki co powoduje zaobserwowaną różnicę?

Algorytm „Cos expansion”

Powierzchnia policzona tym algorytmem ma zminimalizowaną krzywiznę i jest bardzo wygładzona. Algorytm daje dobre rezultaty dla zbiorów danych o małej liczbie [≤100] (używany także do obliczania prędkości średnich). Algorytm może dawać złe wyniki w przypadku blisko położonych, skupionych danych.



Algorytm minimalnej krzywizny (*Minimum Curvature*)

Algorytm MC należy do estymatorów wykorzystujących dopasowanie funkcji (Briggs 1974, Smith, W. H. F., and Wessel, P., 1990). W procedurze obliczeniowej stosowanej w Petrelu estymacja jest podzielona na dwa etapy: interpolację lokalną i globalną ekstrapolację. W trakcie interpolacji lokalnej należy określić promień (*radius*) oddziaływania, który można określić jako:

half cell: połowa komórki (stosowane dla punktów o dużej gęstości)

1 cell: (komórka) dla danych o małej liczebności

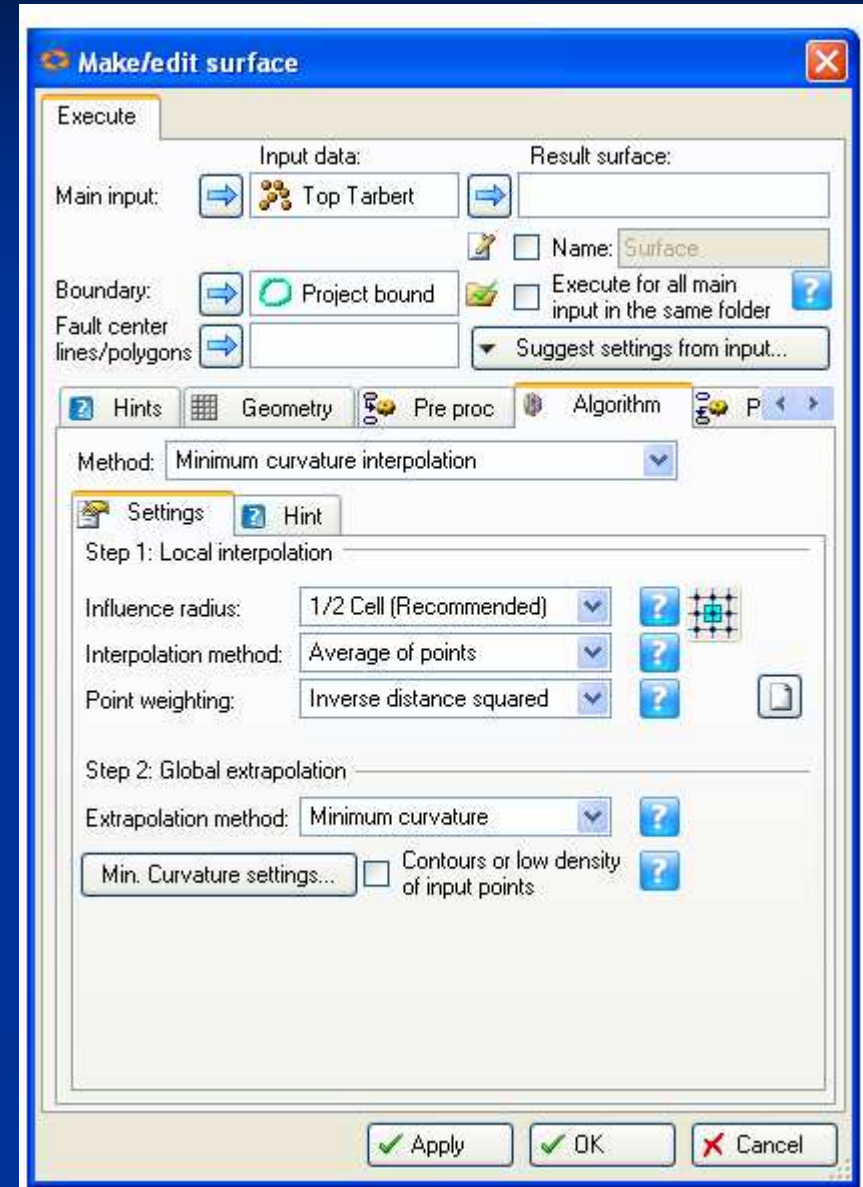
Lokalna interpolacja jest wykonywana algorytmami:

Moving average - stosowany dla danych o małej liczebności (*Average of points*)

Plane

Parabolic stosowany dla danych o dużej liczebności

Użytkownik może również zadeklarować sposób ważenia punktów począwszy – standardową wykorzystywana jest metoda ważenia odwrotnej odległości przy wykładniku potęgowym 2



Algorytm minimalnej krzywizny (*Minimum Curvature*)

Drugi etap – ekstrapolacji globalnej – dokonywany jest z wykorzystaniem algorytmów

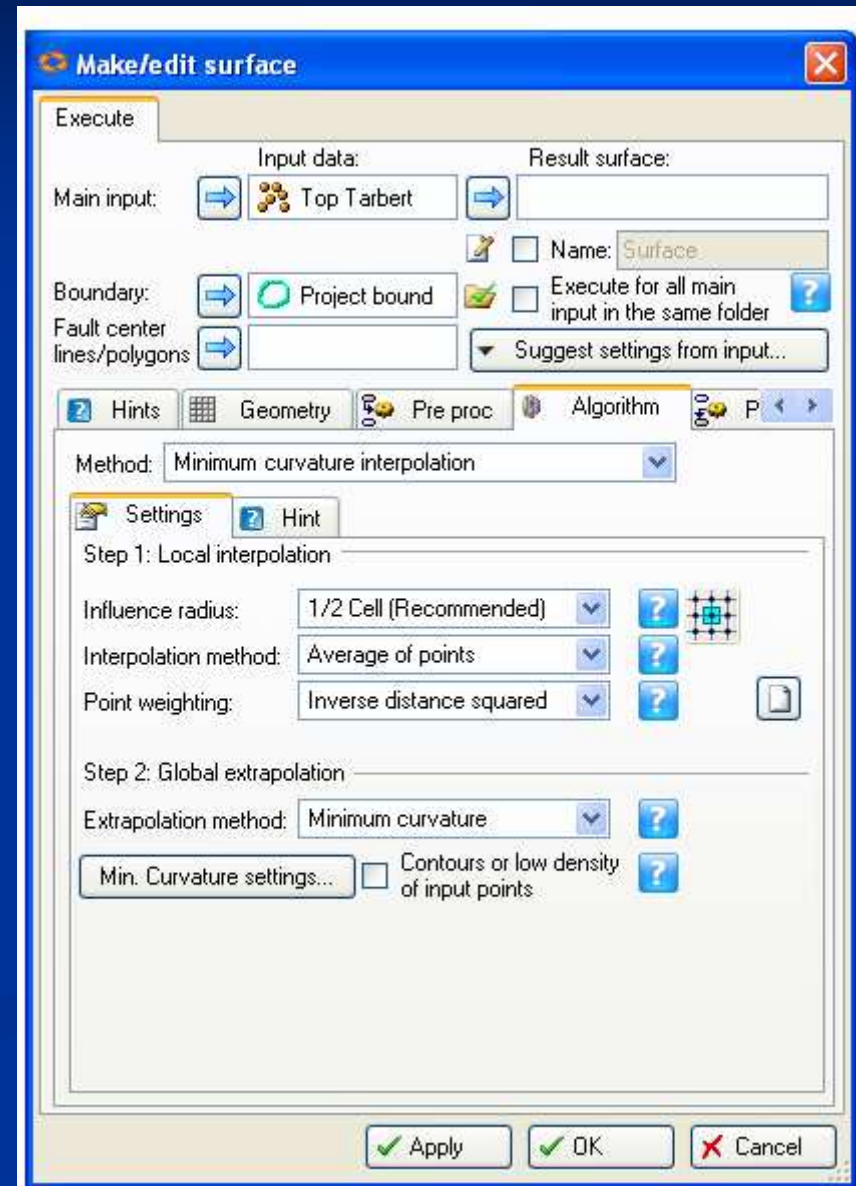
Minimalnej krzywizny (metoda Euler) – swobodnie ekstrapoluje wartości maksymalne i minimalne poza ekstrema obserwowane w danych, szczególnie silnie na obrzeżach grida. W przypadku dużej lokalnej zmienności wartości lub nierównomiernego rozprzestrzenienia danych może dać zdecydowanie nierealistyczne wyniki. Zaletą modeli obliczonych tą metodą jest gładkość.

Metoda „Full –Tension” (operator Laplace)

Daje lepsze rezultaty w przypadku danych o dużej zmienności parametru Z i nierównomiernej dystrybucji przestrzennej. Powstała powierzchnia jest bardzo gładka ale w strefach nie kontrolowanych danymi jest wypłaszczona

Opcja None (tylko debugowanie): Do grida zostaną przypisane wartości wyliczone na etapie interpolacji lokalnej. Opcję ta można wykorzystywać jako rozwiązanie robocze pomagające ocenić jakość danych

Petrel posiada także odmianę algorytmu MC wykorzystującą informację na temat kąta upadu i biegu warstw (*Dip and Azimuth*) informacje te muszą się znaleźć w danych wejściowych

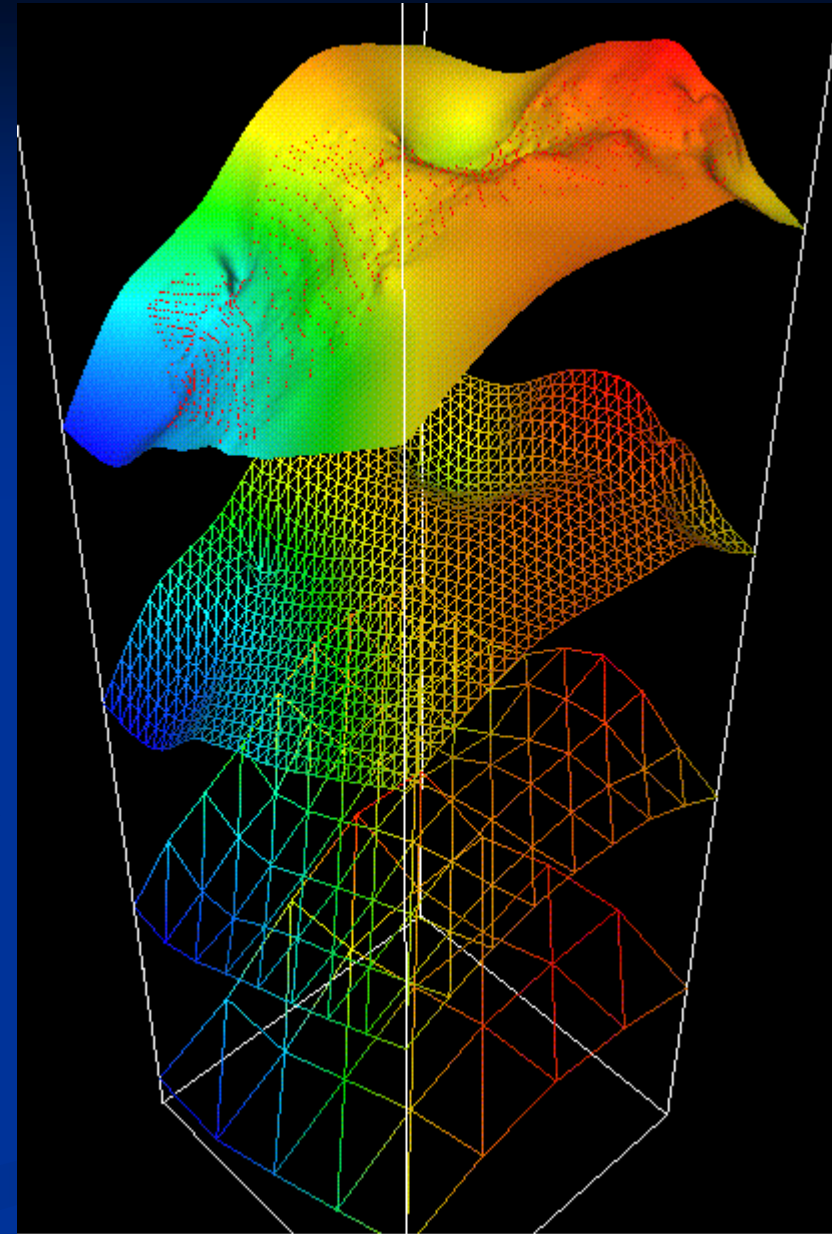


Ćwiczenie 4. Algorytm **Minimum Curvature**

- Dla stropu cenomanu (dane typu *Well Tops: Cenoman.csv*) w domenie głębokościowej lub czasowej i uskoków *USKOKI-CENOMAN.DAT* policzyć grida wykorzystując algorytm Minimum Curvature
- Policz 2 siatki zmieniając ustawienia parametru *Global Extrapolation*

Convergent Intrepolation (Make Surface)

- Iteratywny algorytm do przetwarzania danych, budujący model metodą kolejnych przybliżeń o coraz wyższej rozdzielczości. Pozwala to zachować wysoką dokładność w strefach gdzie dane są liczne oraz utrzymać generalny trend w strefach gdzie dane są rzadkie.
- CG – może być wykorzystywany do danych sejsmicznych (2D i 3D) punktowych (stopy średnie, itp.) wykazujących regularną, nieregularną lub zmienną dystrybucję przestrzenną, do cyfrowanych konturów, modelowania powierzchni uskokowych
- Algorytm w pierwszej (rzadkiej) iteracji wykorzystuje rzeczywiste dane, w kolejnych iteracjach wraz z zagęszczaniem siatki interpolacji podlegają odchyłki wartości danych wejściowych od poprzedniej iteracji. Jest to tzw. strategia **Multigridu** stosowana także w algorytmach z grupy minimalnej krzywizny (Terzopoulos 1998)
- W trakcie każdej iteracji wykonywana jest następująca sekwencja obliczeniowa:
 - **Refine** – zagęszczenie grida.
 - **Snap** – dowiązanie grida do danych (dodanie residuum)
 - **Smooth** - wygładzenie z wykorzystaniem operatora biharmonicznego.

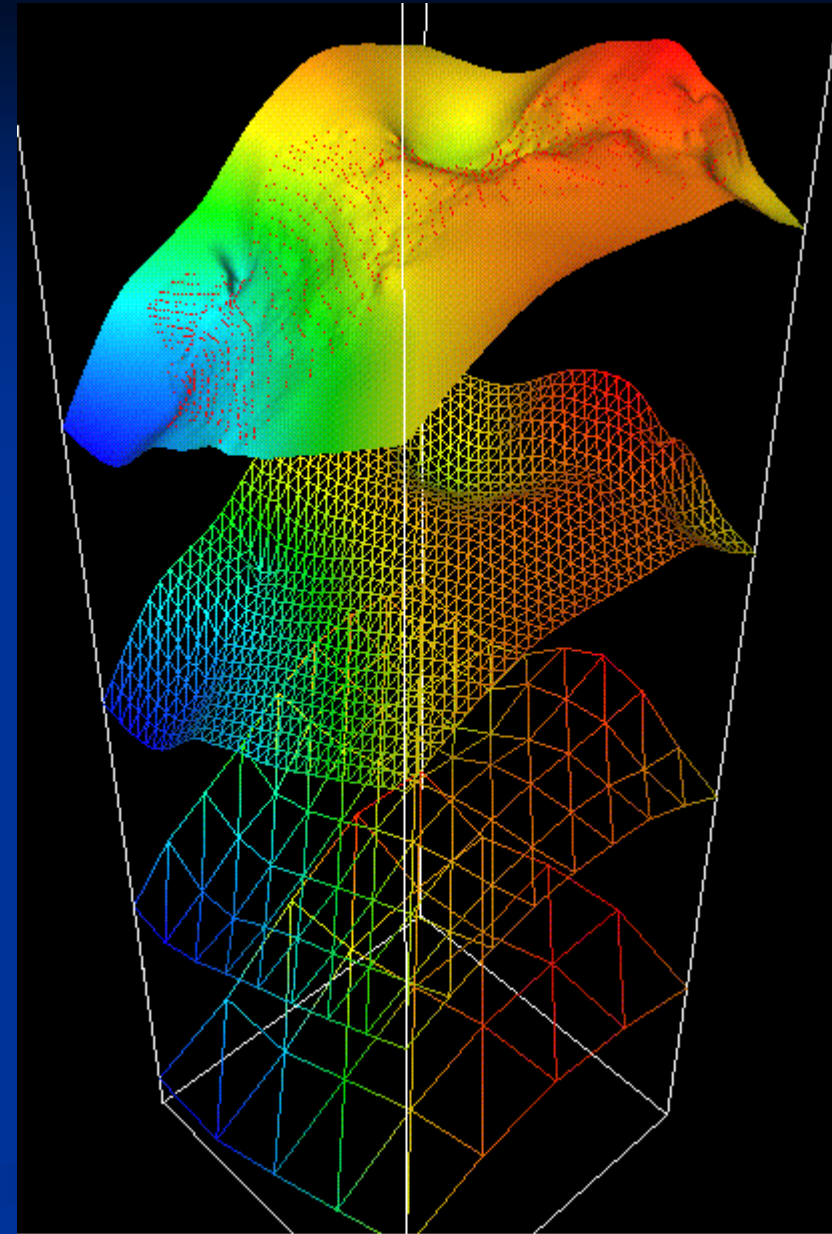


Convergent Gridder (Make Surface)

- Jego główną zaletą jest duża szybkość przetwarzania (nie sortuje danych i nie wybiera próbek) oraz możliwość poprawnego modelowania na podstawie danych o zmiennej dystrybucji

CG – zawsze dokonuje ekstrapolacji danych na dystans równy dwukrotnemu, początkowemu spacjowaniu siatki (pierwsza iteracja), (wielkość ta jest obliczana automatycznie). Użytkownik ma kontrolę nad wielkością ekstrapolacji poprzez procedurę *Post-Processing*.

- Algorytm CG można stosować do budowania modeli dokładnych (np. dane otworowe) i przybliżonych (np. sejsmika).
- Algorytm bierze pod uwagę istnienie uskoku – można go także używać do modelowania powierzchni uskoku.



Ćwiczenie 5. Algorytm Minimum Curvature i Convergent Interpolation

Dla wyników interpretacji sejmiki *kreda1-niezgodnosc-N.DAT*

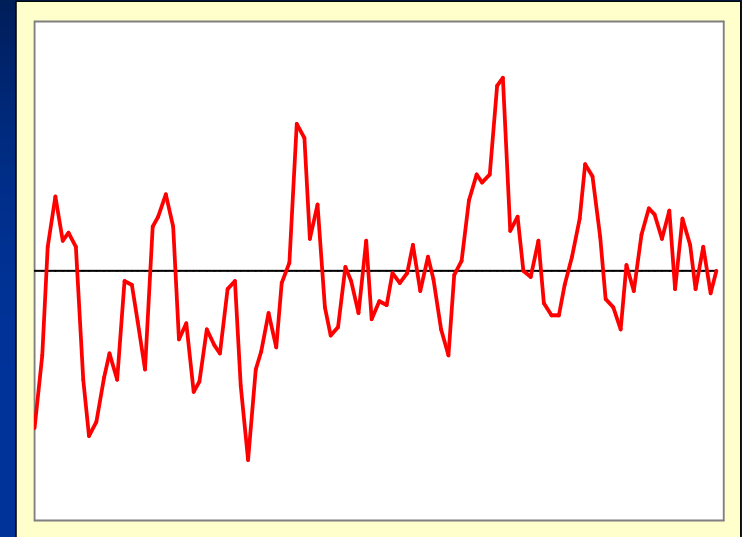
uskoki : *USKOKI-CENOMAN.DAT*. policzyć grida wykorzystując algorytm Minimum Curvature oraz Convergent Interpolation - policz 2 siatki.

Spróbuj zoptymalizować wynik estymacji zmieniając podstawowe parametry procedur.

Kriging

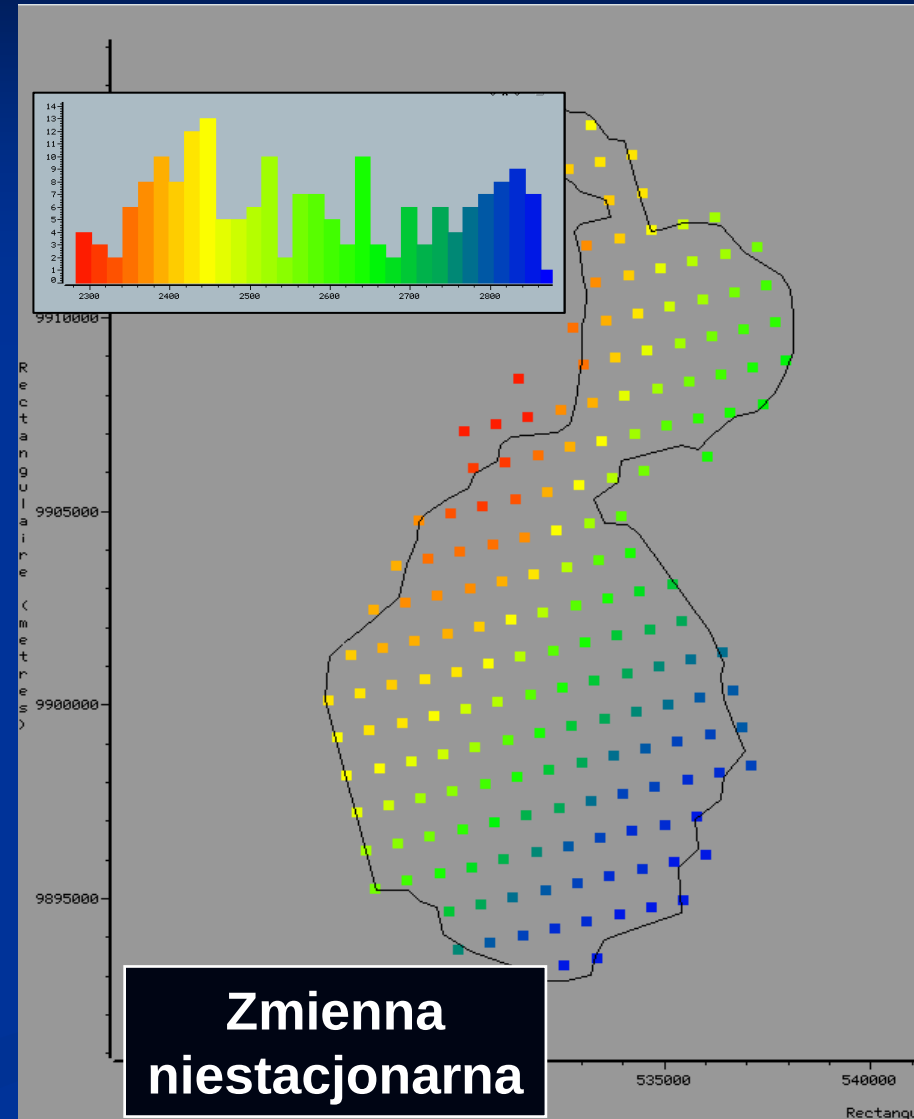
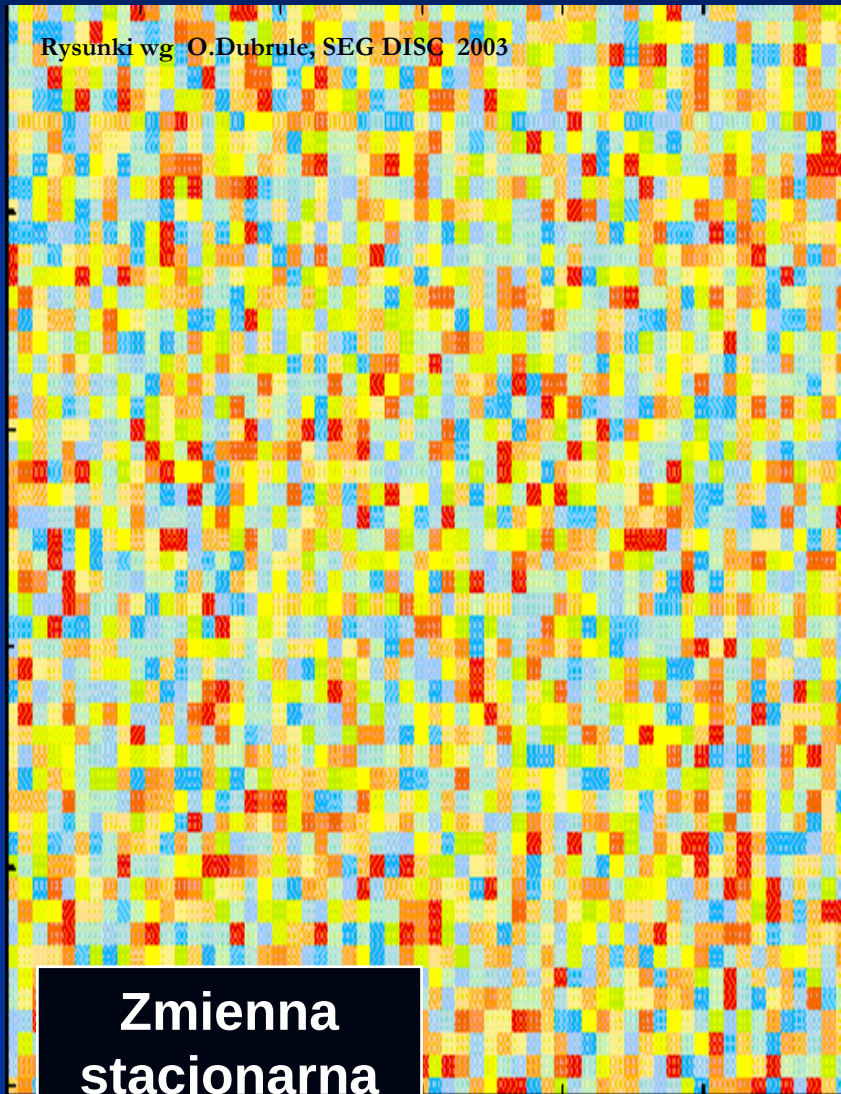
Kriging jest deterministyczna technika estymacji. U jego podstaw leży szereg założeń. Najważniejsze z nich to:

- Zmienność analizowanego parametru nie jest ani całkowicie deterministyczna, ani całkowicie przypadkowa (losowa).
- Jeżeli pomiędzy punktami występuje związek (tzn. istotna autokorelacja między danymi) to ciągły model "struktury" można estymować na podstawie sąsiednich punktów, choć wartość nieznanego punktu nie jest całkowicie zależna od wartości sąsiednich punktów.
- Analizowany parametr Z jest w terminologii geostatystycznej określany jako „zmienna zregionalizowana” (*regionalised variable*), może się on składać z komponentu trendowego - regionalnego lub lokalnego - nazywanego *drift* oraz komponentu resztkowego (*residual*).
- Ponadto, przyjmowane jest również założenie, że zmienna zregionalizowana charakteryzuje się słabą stacjonarnością (*stationarity*) - tzn. wartość oczekiwana zmiennej jest niezależna od miejsca jej występowania, zaś kowariancja jest jedynie funkcją odległości pomiędzy punktami pomiarów.
- Zmienność wartości Z w zbiorze danych jest funkcją odległości i kierunków. Punkty leżące blisko siebie na ogół wykazują mniejszą zmienność, niż punkty bardziej od siebie oddalone. Podobna zależność wiąże się z kierunkami dystrybucji - wzdłuż pewnych kierunków równo oddalone punkty wykazują mniejsze zmienności niż wzdłuż innych



Kriging – stacjonarność zmiennej

Rysunki wg O.Dubrule, SEG DISC 2003

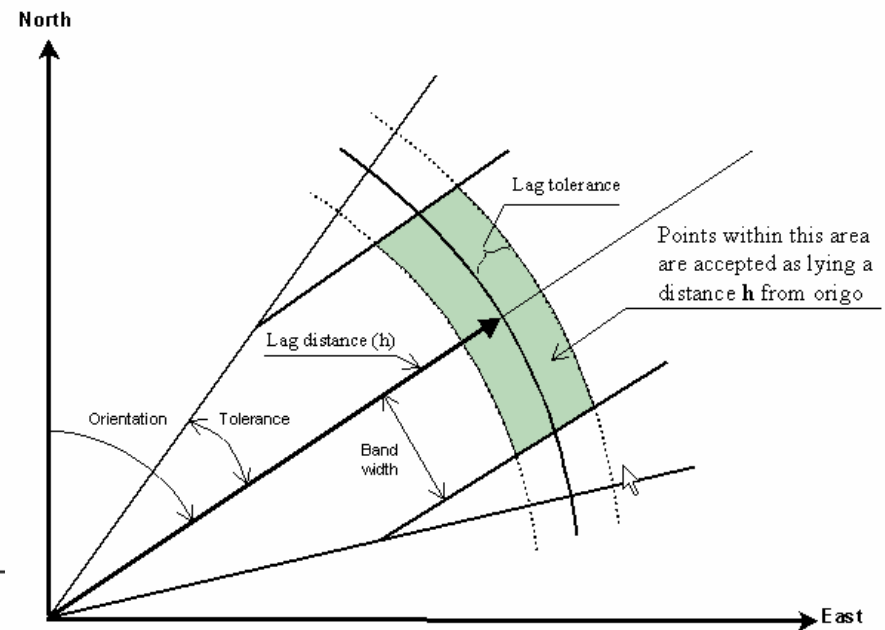
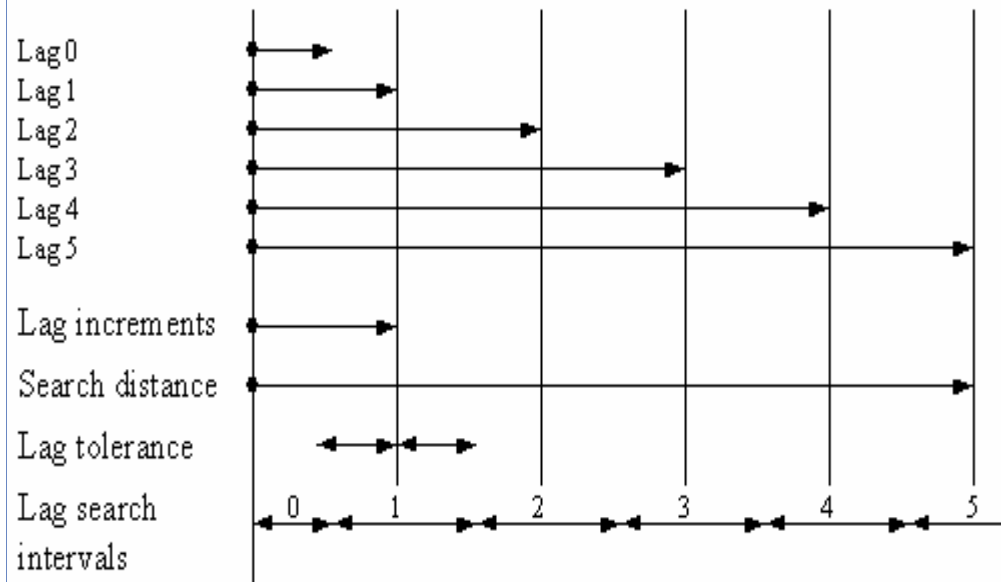


Kriging - semiwariogramy

Wyszukiwanie danych do stworzenia wariogramu

Sposób wyszukiwania danych definiują następujące parametry:

- **Search distance** – maksymalny zasięg wyszukiwania
- **Lag** (interwał wyszukiwania, separacja) lub liczba interwałów wyszukiwania (*number of lags*) i tolerancja wyszukiwania w interwale (*Lag tolerance*),
- Orientacja osi wyszukiwania (względem północy geograficznej, wyrażona w stopniach)
- Szerokość strefy wyszukiwania (**Band Width**) wyrażona w metrach



Kriging - semiwariogramy

Wariogramy (semiwariogramy) eksperymentalne (**Sample variogram**) mogą być obliczane w dowolnym kierunku. W Petrelu są one określone w wyniku analizy danych lub arbitralnie wzdłuż głównego kierunku zmienności (**Major Direction**) i prostopadły do niego kierunek najsłabszej ciągłości parametru (**Minor Direction**). Możliwe jest także obliczanie wariogramu pionowego (**Vertical Direction**), odwzorowującego zmienność parametrów w profilu otworu.

Silę związku poszczególnych punktów opisuje wariogram eksperymentalny który jest obliczany na podstawie danych najczęściej leżących wzdłuż osi wyszukiwania. W Petrelu wariogram można stworzyć z wykorzystaniem procedury (**DATA ANALYSIS**)

Wariogram jest liczony wg wzoru:

$$2\gamma(h) = \Sigma(Z_i - Z_{i+n})^2 / N(h)$$

gdzie :

$2\gamma(h)$ - wariancja dla interwału przeszukiwania h (lag)

Z_i - wartość zmiennej geologicznej w i -tym punkcie położonym w obrębie interwału

Z_{i+n} - wartość zmiennej geologicznej w punkcie $i+n$ w interwale h

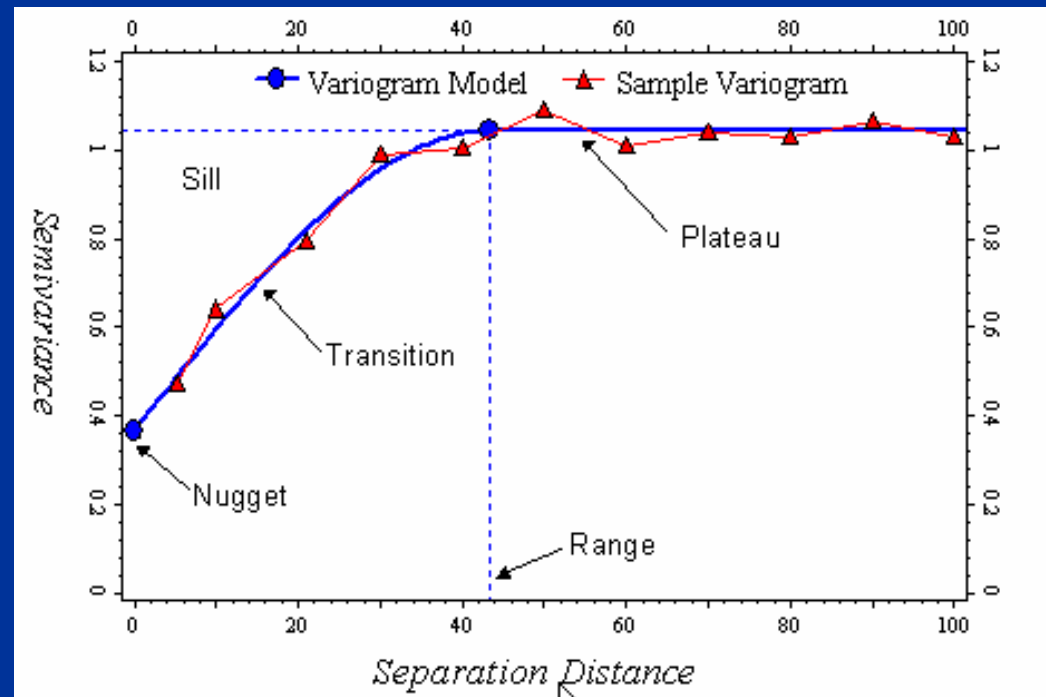
$N(h)$ - liczba par punktów w interwale h (lag)\

Kriging - wariogramy

- Do wariogramu eksperymentalnego dopasowywany jest model matematyczny (Wariogram)

Definiują go następujące parametry:

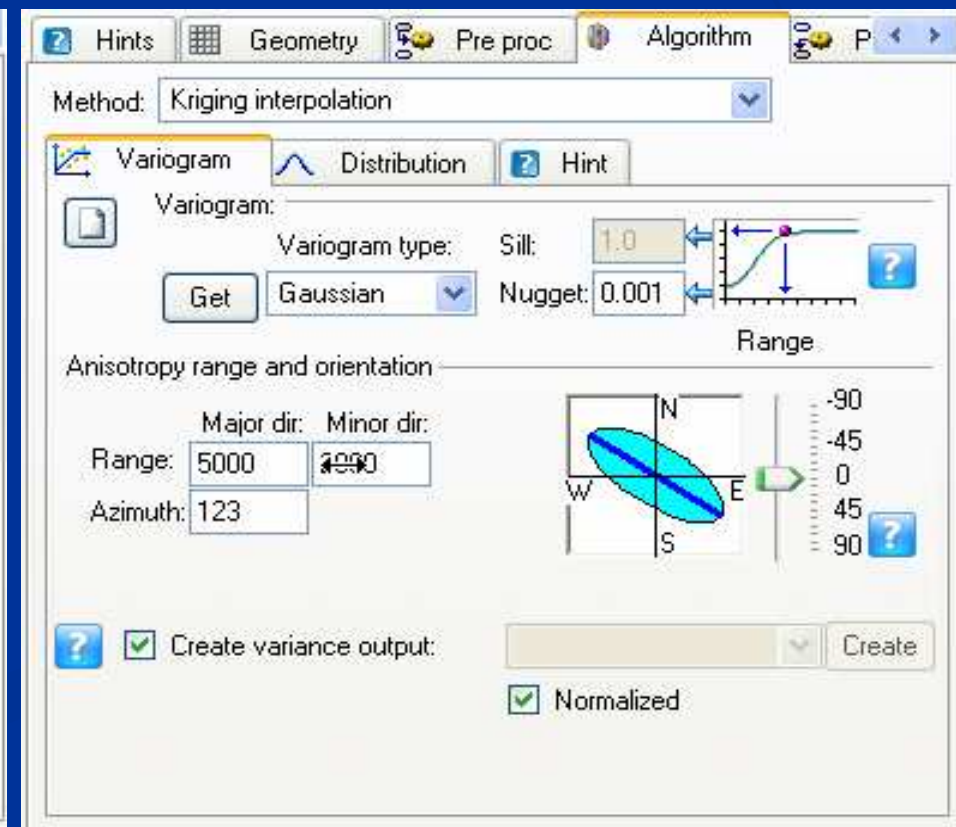
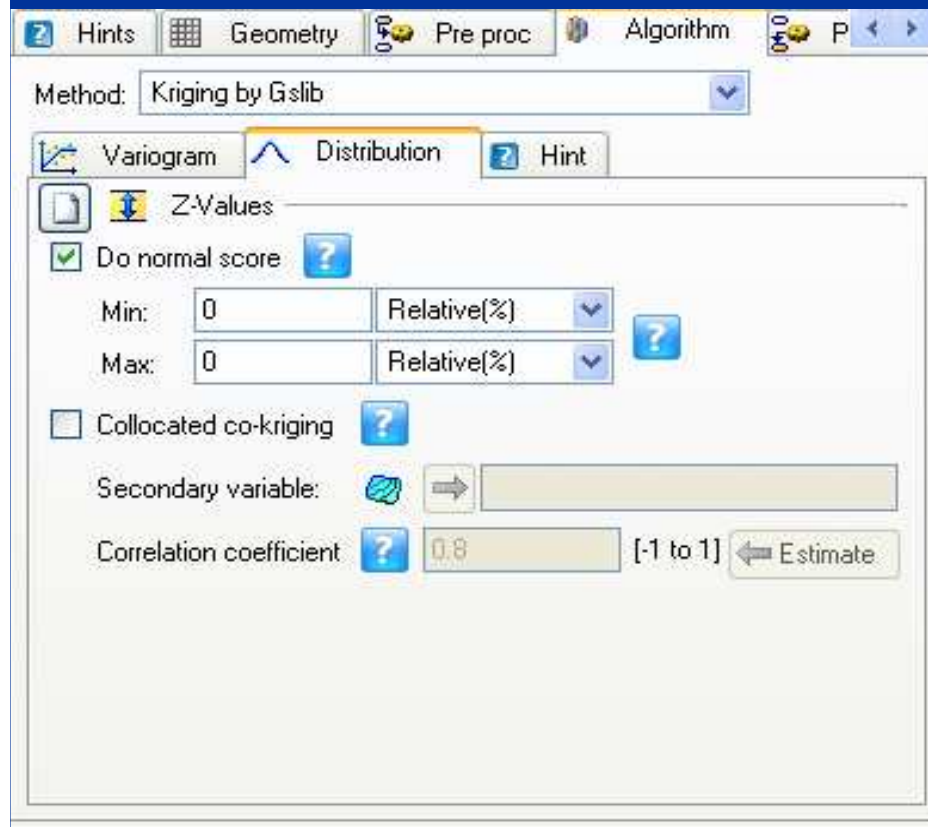
- Nugget – semiwariancja dla odległości przedziału separacji 0 . Definiuje zmienność danych w małej skali lub ich dokładność
- Plateau strefa spłaszczenia wariogramu
- Sill wielkość semiwariancji dla której następuje spłaszczenie wariogramów teoretycznego i eksperymentalnego.
- Transition - strefa w której wariogram wykazuje wzrost wartości semiwariancji
- Range maksymalny dystans separacji dla którego obserwowane jest przejście wariogramu do strefy spłaszczonej (sill)



Kriging w Petrelu

Obejmuje algorytm wewnętrzny (*Kriging Interpolation*). Jest to stosunkowo prosta wersja algorytmu nie pozwalająca dokonać „detrendowania” danych. Jedyna dostępna transformacja danych obejmuje przekształcenie rozkładu populacji do rozkładu normalnego .

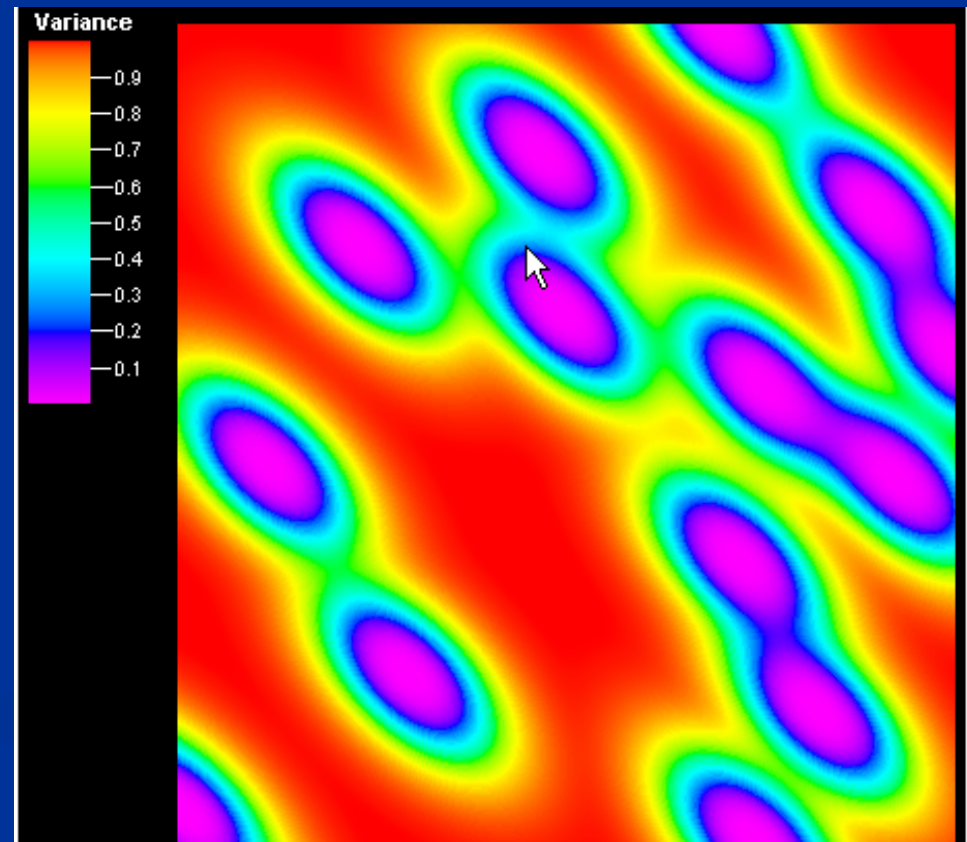
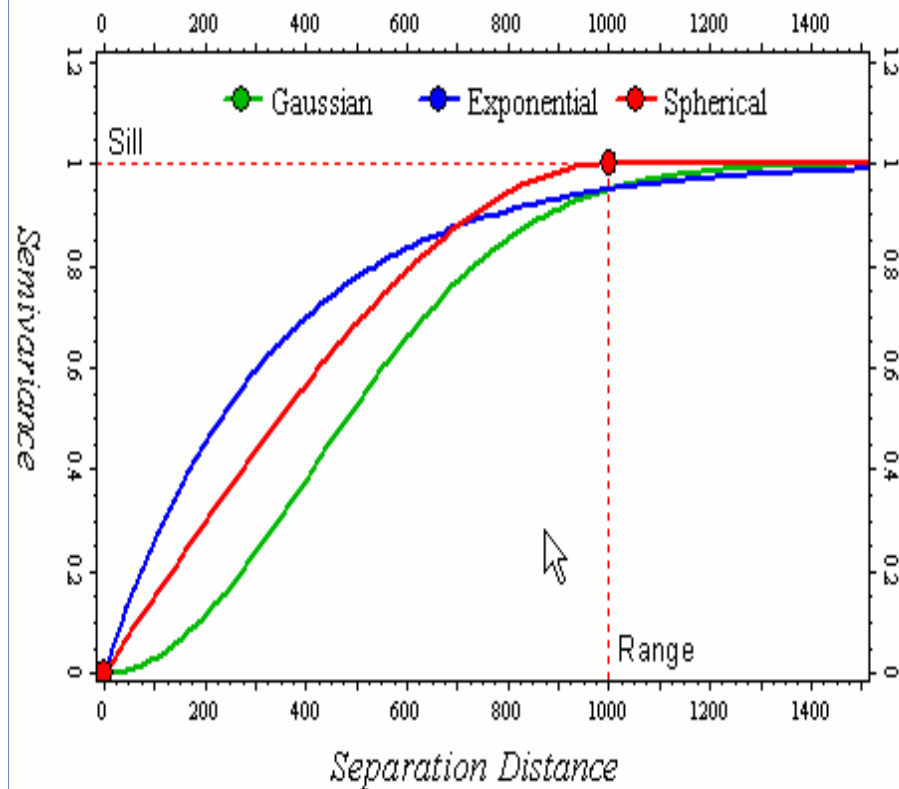
Bardziej zaawansowany jest algorytm **Kriging Gslib** uruchamiany zewnętrznie . Pochodzi on z zasobów Geostatistic Library (USA). Umożliwia on wzbogacenie procedury estymacji poprzez jej skorelowanie z inną zmienną (Collocated co-kriging). Jest to cenne ze względu na zwiększenie ciągłości estymacji niektórych bardzo niejednorodnych zmiennych np. przepuszczalność jest korelowana z porowatością.



Kriging

Typy podstawowych wariogramów
teoretycznych stosowanych
w Petrelu

Mapa wariancji – w miejscu
gdzie znajduje się odwiert
wariancja jest minimalna



Algorytm *Sequential Gaussian Simulation* (SGS)

- SGS jest stochastycznym algorytmem rozwiniętym na bazie krigingu – honoruje m.in. dane wejściowe, statystyczne dystrybucje danych wejściowych, trendy i wariogramy,
- W trakcie estymacji program losowo generuje anomalie dodatnie i ujemne, honorując rozkłady danych wejściowych. W celu zrozumienia zakresu ryzyka modelu polecane jest wykonanie kilku realizacji,
- Jeśli użytkownik nie posiada dodatkowych informacji program używa do stworzenia grida tylko danych wejściowych, w rezultacie modelowanie jest słabo kontrolowane, a wyliczone maksima i minima mogą znacznie przekraczać zmienność użytych danych,
- Modelowanie algorytmem SGS polega na stopniowym wypełnianiu modelu wartościami. Algorytm należy do grupy technik tzw. conditional (warunkowanych) tzn. zapewniających pełną zgodność modelu i danych wejściowych. W przestrzeni pomiędzy danymi modelowanie poszczególnych węzłów odbywa się w sposób losowy, model wypełnia się wartościami poprzez uruchamianie w kolejnych miejscach procedury krigingu. Program ustala dla danego węzła grida variancję i pobiera wartość z użytej dystrybucji danych wejściowych. Kolejne węzły siatki są obliczane z wykorzystaniem wartości obliczonych w poprzednich węzłach. W rezultacie wyniki obliczeń w ostatnich węzłach są silnie ograniczone i uwarunkowane zmiennością (dystrybucją danych wejściowych i wynikami wcześniejszych estymacji). By uniknąć powstawania systematycznego błędu należy zapewnić w pełni losową kolejność obliczania (*cell visitation order*).

Algorytm *Sequential Gaussian Simulation* SGS

- W trakcie estymacji program może dokonać czasowej zamiany (rzeczywistej) dystrybucji (zmienności) danych wejściowych do postaci standaryzowanego w celu zminimalizowania błędów procedury krigingu.

