

MODELOWANIE TEKTONIKI NA PRZYKŁADZIE ZŁOŻA WĘGLA BRUNATNEGO „SOLNTSEVSKOYE”

MODELING OF THE TECTONIC FAULTS ON THE EXAMPLE OF BROWN COAL DEPOSIT “SOLNTSEVSKOYE”

Andrzej Gądek - Ventyx International, Oddział w Katowicach

Zbudowanie spójnego modelu strukturalnego serii pokładów węgla, rozszczepionych i zaburzonych bogatą tektoniką stanowi wyzwanie zarówno dla twórcy modelu jak i dla metody oraz użytego narzędzia. Ten artykuł opisuje to wyzwanie oraz metodę zastosowaną do modelowania konkretnego złoża o takiej właśnie charakterystyce.

Słowa kluczowe: model, złożo, pokład, uskok, MineScape

Building a consistent structural model of the series of coal seams, containing seam splits and affected by a complex system of tectonic faults constitutes a challenge for the model creator as well as the modeling method and the tool adopted. This article describes that challenge and the method employed to model a particular deposit of characteristics meeting these criteria.

Key words: model, deposit, seam, fault, MineScape

Przedmiot modelowania i dane źródłowe

Złożo węgla brunatnego Solntsevskoye położone jest przy zachodnim brzegu centralnej części wyspy Sachalin, w Rejonie Uglegorskim, 20 km na południe od miasta Uglegorsk.

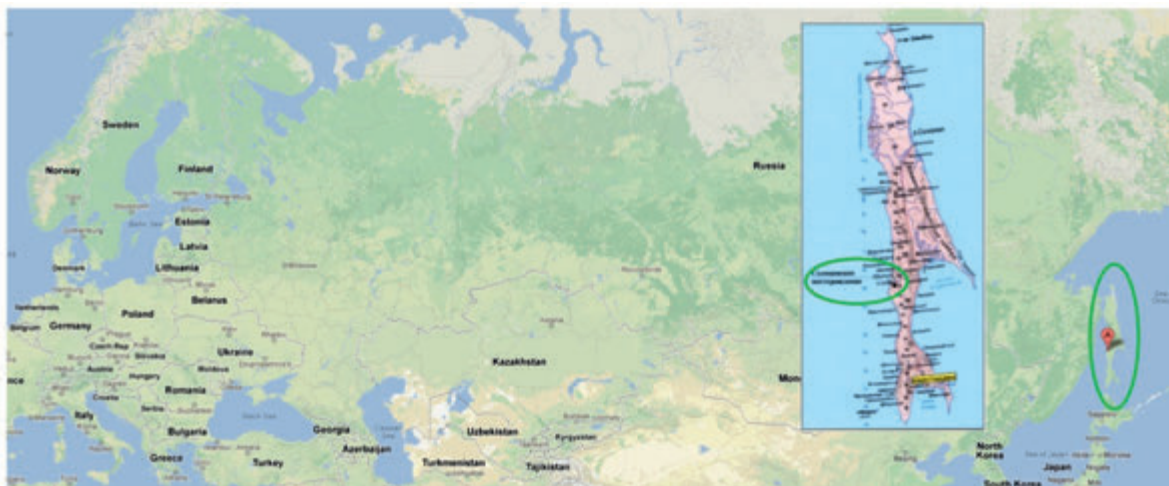
Maksymalna głębokość zalegania pokładów węgla to 455 – 480 m. Synklinalna struktura złoża jest zaburzona przez uskoki o zróżnicowanych azymutach i zrzutach, które przyczyniają się do blokowej budowy pokładów. Zrzuty uskoków zmieniają się od 10-20 m i mniejszych aż do 100 m i więcej. W obszarze zainteresowania stwierdzono w sumie 102 uskoki, z których w modelu uwzględniono 57.

Jest to wielopokładowe złożo węgla kamiennego utworzone przez 11 pokładów o zróżnicowanej miąższości, silnie zaburzone tektonicznie. Dane wejściowe dla modelu to:

Dane z otworów

Dane o lokalizacji, ułożeniu i orientacji osi otworów dokumentacyjnych oraz o stwierdzeniach pokładów pochodzących z tych otworów dostarczone były w formie następujących arkuszy:

- Otwory i stwierdzenia pokładów (Boreholes_and_layer_intersections_rating_table.xlsx),



Rys. 1. Lokalizacja złoża Solntsevskoye
Fig. 1. Location map of the deposit

- Głębokości otworów (Borehole_bottom_rating_table.xls),
Poniższe ilustracje (rys. 2) to reprezentowane fragmenty tych arkuszy.

Dane o uskokach

Przekazane dane dot. uskoków, to ich ślady na powierzchniach spągów kolejnych pokładów wraz z opisami wielkości zrzutów i nachyleń powierzchni uskokowych. Dane te stanowią jedynie interpretację danych pochodzących z otworów

wiertniczych. Interpretowane ślady uskoków na powierzchni spągu pokładu nr 4 przedstawia rysunek 3. W podobnej formie udostępnione były ślady uskoków na spągach wszystkich 11 pokładów.

Interpretacja stwierdzeń i uskoków na przekrojach

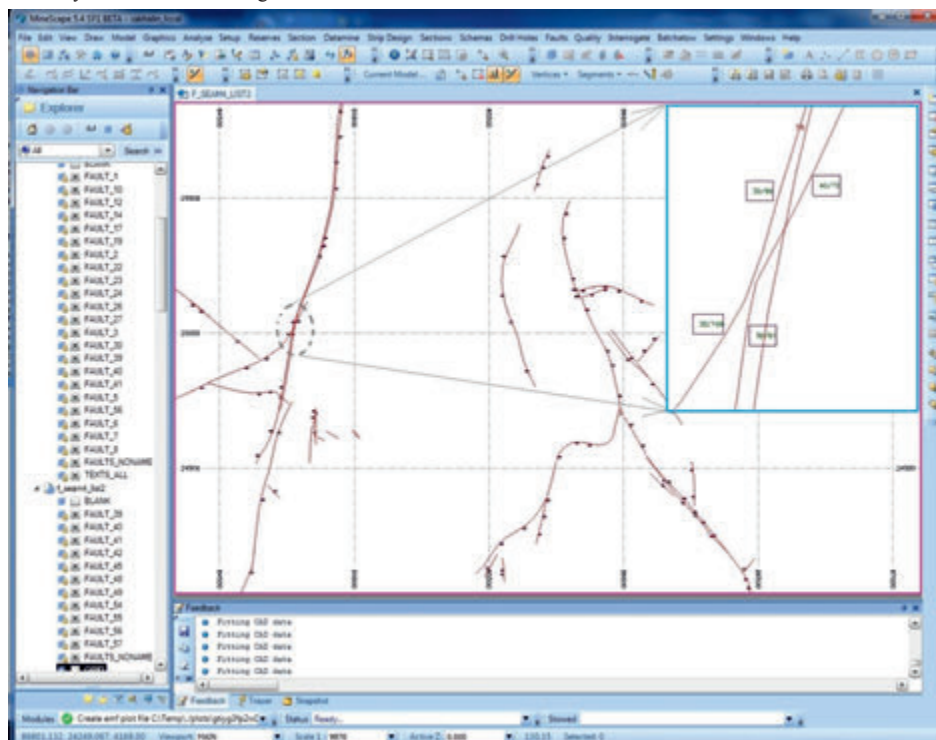
Oprócz danych cyfrowych opisanych powyżej, dostarczone były rastrowe obrazy ręcznie kreślonych przekrojów geologicznych, zawierających interpretację geologiczną

Well_ID	Seam	Depth	X	Y	Z	Note
109		0.00	23199.0	86864.5	59.8	collar
113		0.00	24225.0	85976.3	53.4	collar
113	III	44.85	24225.00	85976.30	8.60	roof
113	III	46.50	24225.00	85976.30	6.90	floor
114		0.00	24304.0	86017.1	52.5	collar
114	II	19.40	24304.00	86017.10	33.10	roof
114	II	23.65	24304.00	86017.10	28.80	floor
115		0.00	24352.3	85944.4	55.0	collar
115	II	12.95	24352.30	85944.40	42.00	roof
115	II	17.00	24352.30	85944.40	38.00	floor
116		0.00	24084.8	86058.4	66.6	collar
116	III	56.00	24084.80	86058.40	10.60	roof
116	III	57.30	24084.80	86058.40	9.30	floor
117		0.00	24177.0	86037.6	66.4	collar
117	II	10.00	24177.00	86037.60	56.40	roof
117	II	13.60	24177.00	86037.60	52.80	floor
118		0.00	24055.0	85710.40	71.8	collar
118	IV	5.55	24055.00	85710.40	66.20	roof
118	IV	21.65	24055.00	85710.40	50.20	floor
120		0.00	24094.7	85640.4	84.2	collar
120	IV	12.40	24094.70	85640.40	71.80	roof

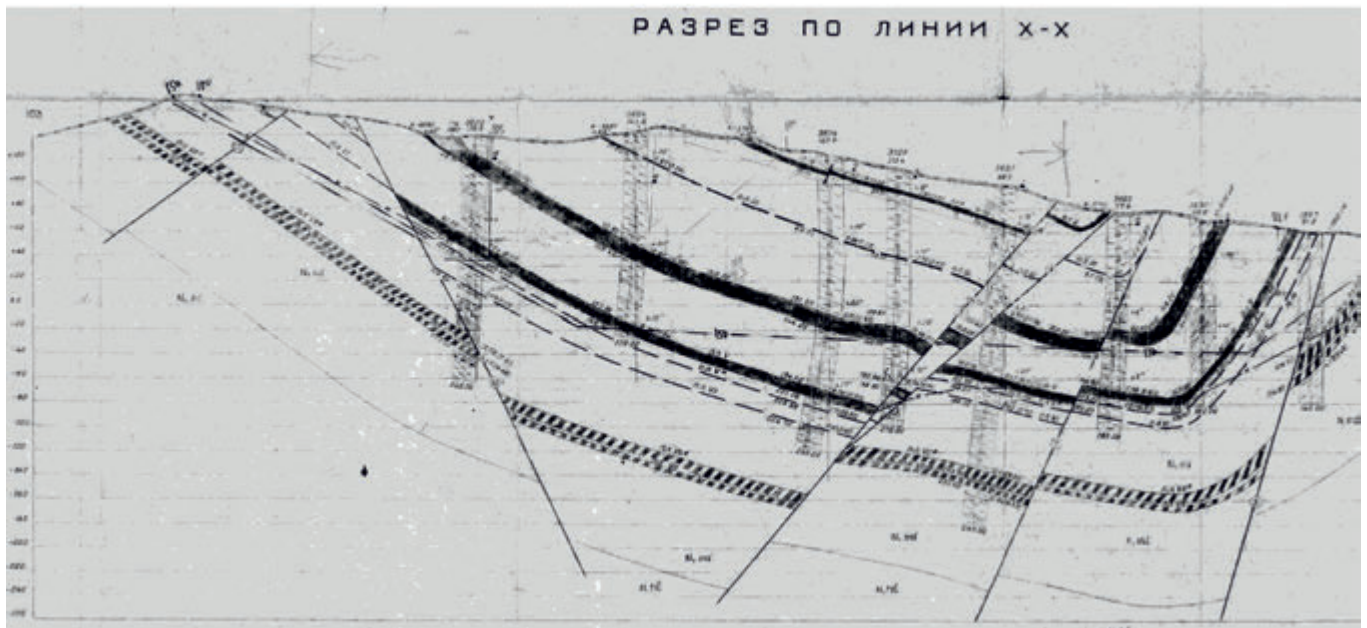
Well_ID	Depth
3459	340
3461	420
3462	310
3464	331
3465	370
3466	510
3468	430
3470	200
3471	310
3472	301
242-4	60
242-5	50
242-6	50
242-7	60
242-8	45
242-9	45
242-10	45
242-11	45
242-12	45

Well_ID	Nazwa otworu
Seam	Nazwa pokładu węgla
Depth	Głębokość wzdłuż osi otworu, [m]
X	Współrzędna Easting [m]
Y	Współrzędna Northing [m]
Z	Wysokość n.p.m. [m]
Note	Typ stwierdzenia: "collar" zrab, "roof" strop, "floor" spąg

Rys. 2. Fragment tabeli otworów i stwierdzeń
Fig. 2. Part of Boreholes and layer intersections rating table



Rys. 3. Ślady uskoków na powierzchni spągu pokładu 4
Fig. 3. Fault traces on seam 4 floor



Rys. 4. Przekrój zawierający interpretację geologiczną struktury pokładów
 Fig. 4. Cross-section containing geological interpretation of seams structure

ułożenia i tektoniki pokładów. Dostarczone 16 takich obrazów, wszystkie w formacie JPEG. Na rysunku 4 jest jeden z tych przekrojów.

kładach. Na rysunku 5 podana jest również lista nazw pokładów podlegających modelowaniu i ich cech szczególnych. Np. P3T i P3L to ławy: górna i dolna pokładu P3.

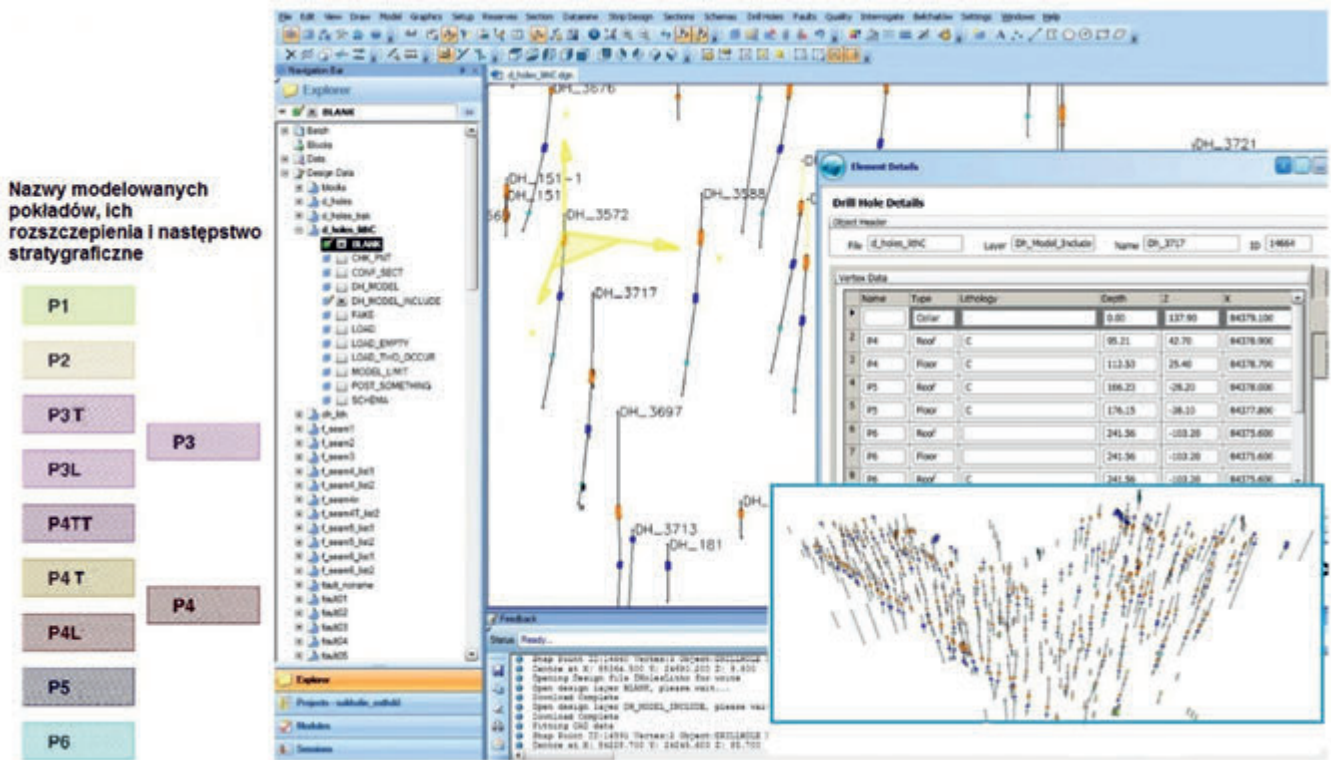
Przetworzenie danych do modelu

Otwory

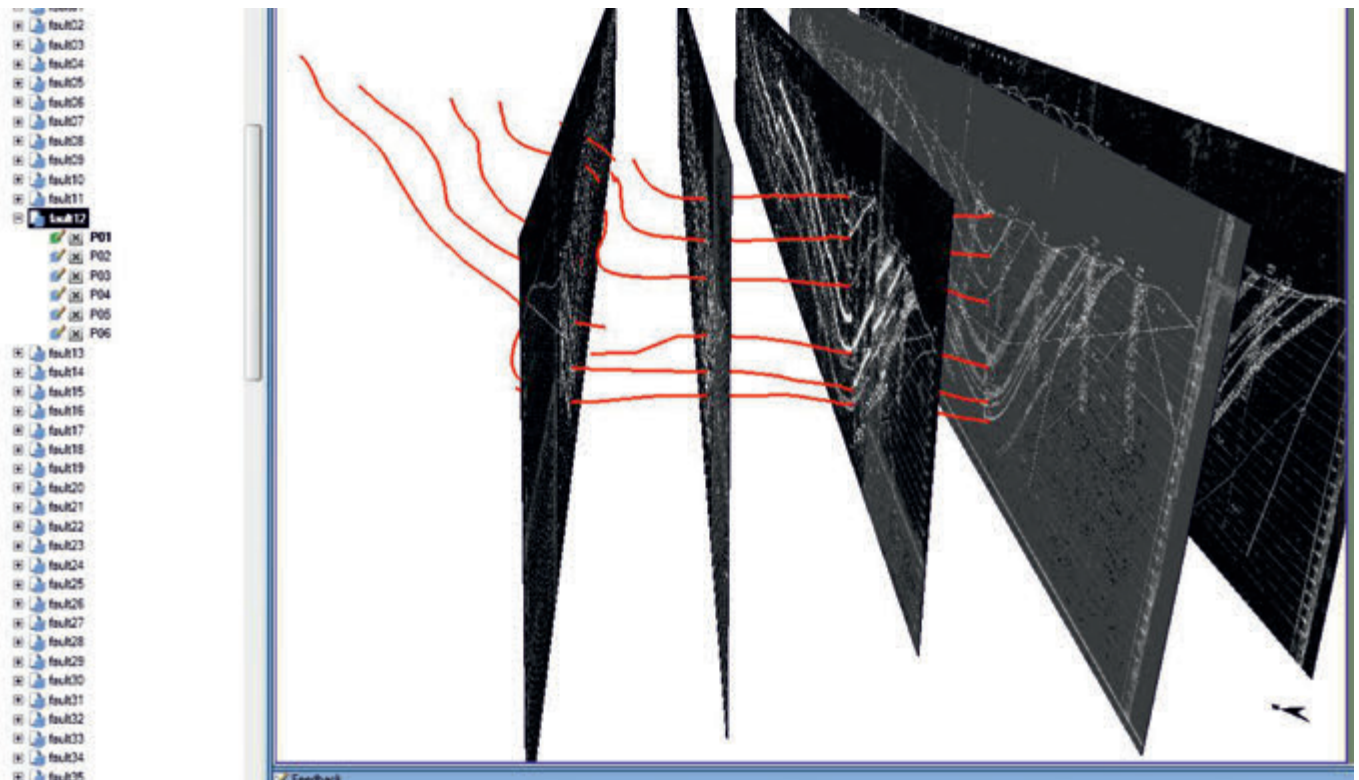
Na podstawie danych o otworach oraz stwierdzeń pokładów w tych otworach, stworzone zostały obiekty graficzne typu otwór i umieszczone we właściwych współrzędnych w przestrzeni 3D CAD. Każdy taki obiekt graficzny przedstawiający otwór zawiera informację o stwierdzonych w tym otworze po-

Przekroje

Obrazy przekrojów zostały umieszczone na właściwych im współrzędnych, w plikach graficznych. Tak skalibrowane obrazy przekrojów posłużyły później, do tworzenia modelu i kontroli jego zgodności z koncepcją zaproponowaną przez zleceniodawcę (właściciela informacji geologicznej).



Rys. 5. Następnstwo pokładów i obiekty graficzne typu otwór stworzone w pliku CAD
 Fig. 5. Stratigraphical order of seams and drill hole graphical objects created in CAD

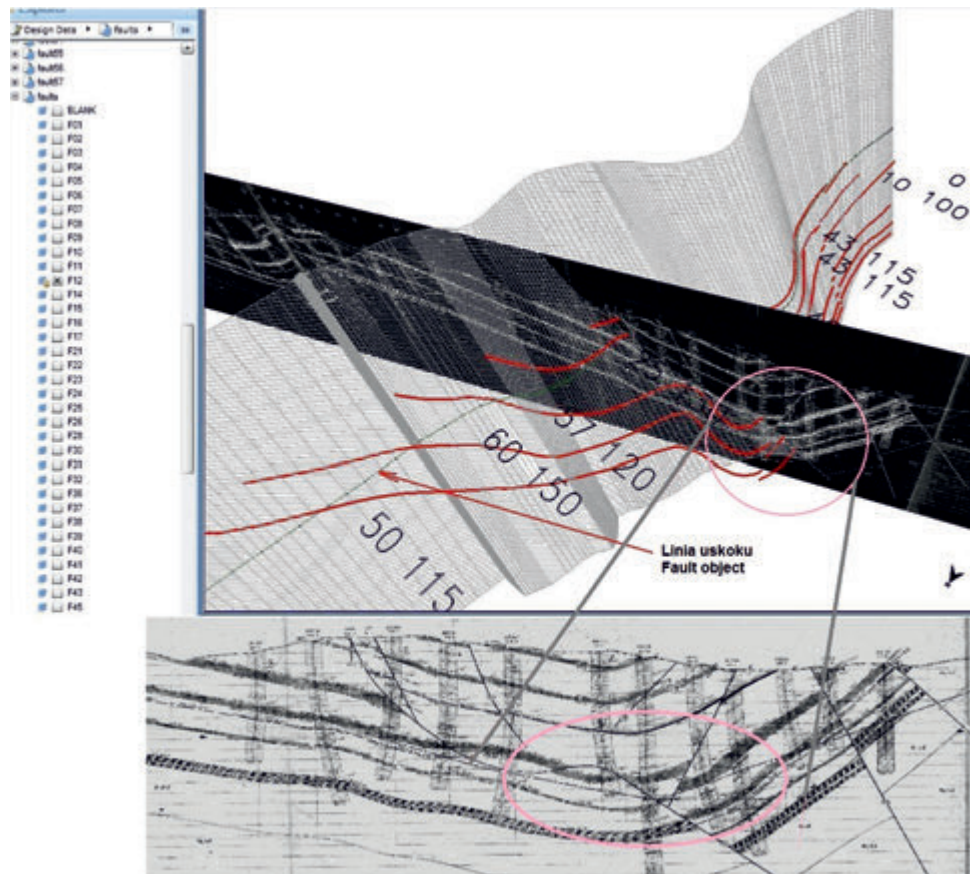


Rys. 6. Obrazy przekrojów geologicznych umieszczonych w przestrzeni wraz ze śladami jednego z uskoków
 Fig. 6. Images of hand-drawn cross sections calibrated in 3D along with a particular fault traces

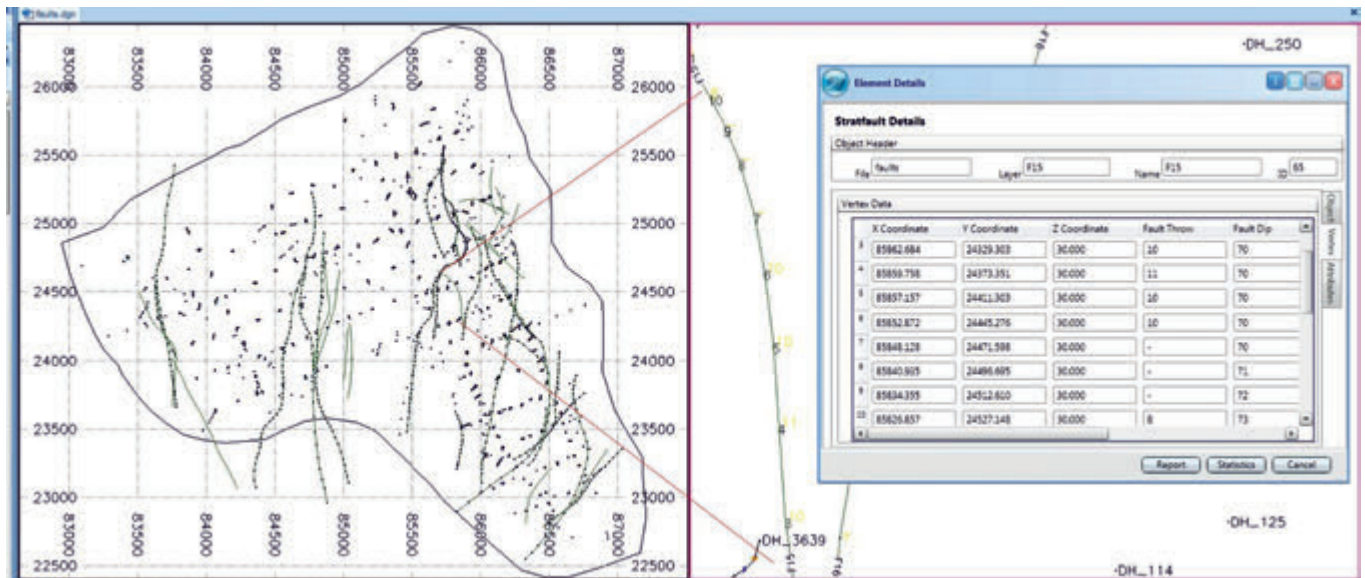
Uskoki

W drodze grupowania śladów uskoków na powierzchniach spągów kolejnych pokładów, utworzono grupy linii reprezentujących powierzchnie uskokowe kolejnych uskoków (rys. 6).

Linie te przedstawiają rozciągłości powierzchni uskokowych i wzdłuż każdej takiej linii, w jej kolejnych wierzchołkach zakodowane są wielkości nachylenia powierzchni uskokowej i zrzutu uskoku.



Rys. 7. Obiekt graficzny typu uskok wraz z przekrojem umieszczone w wspólnej przestrzeni w pliku typu CAD
 Fig. 7. Graphical object fault together with the cross section scan calibrated in the 3D graphical file



Rys. 8. Obiekty graficzne typu uskok biorące udział w modelowaniu
Fig. 8. Graphical fault objects used in modelling

Modelowanie

Wpasowanie uskoku

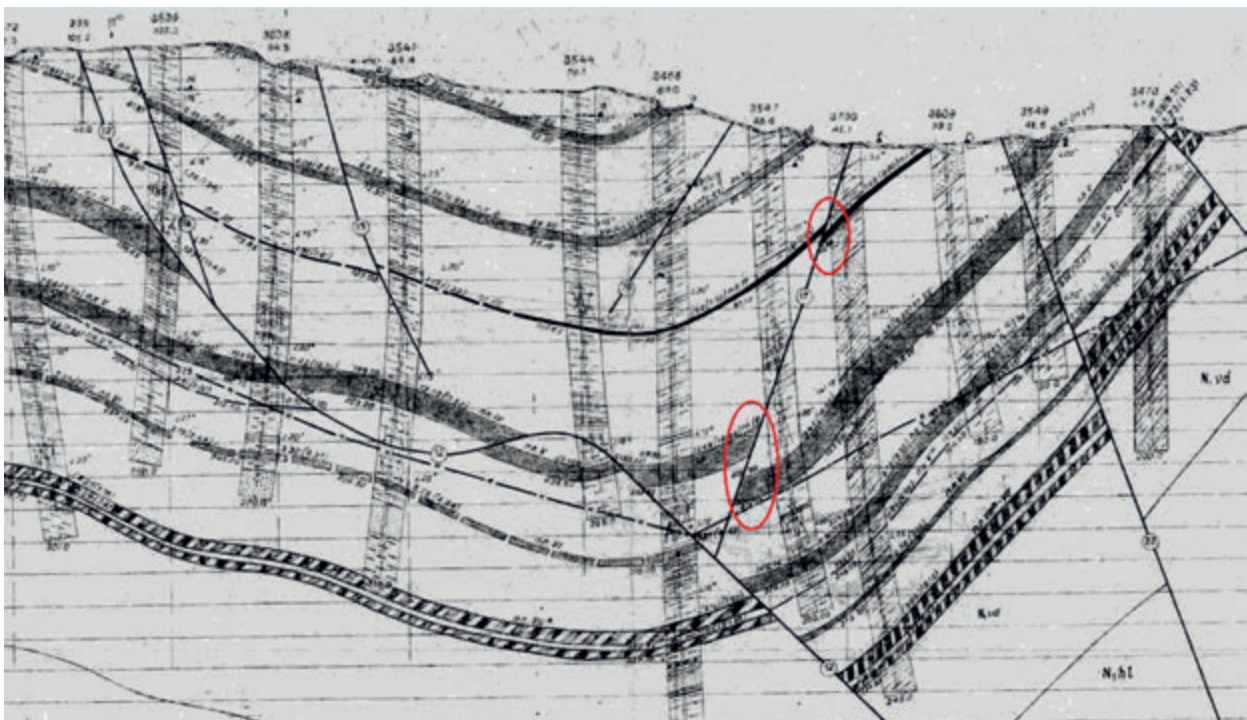
Na rysunku 8 pokazane są wszystkie linie uskoku biorące udział w modelowaniu. W prawej części ilustracji powiększenie jednego z uskoku i jego szczegóły. W kolejnych wierzchołkach zakodowane są różne wielkości zrzutu uskoku.

Na rysunku 9 zaznaczono dwa różne pokłady zaburzone tym samym uskoku tak, że dla każdego z tych dwóch pokładów ten sam uskok wykazuje inną wielkość zrzutu (w lokalizacji przekroju), a analiza danych wskazuje, że bieg tego uskoku jest prostopadły do linii przekrojowej przedstawionego przekroju. Jednym z etapów prac omawianego projektu, było wykonanie modelu pokładów i uskoku zgodnego również z takimi dostarczonymi przekrojami interpretacyjnymi.

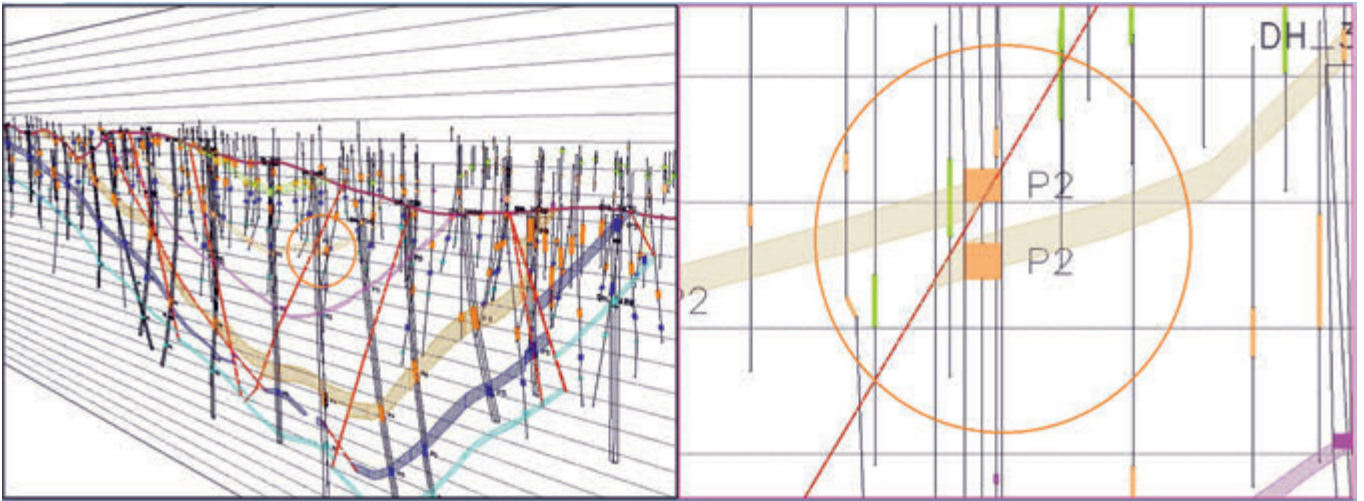
W ramach modelowania istotnym zadaniem było sprawdzenie spójności pomiędzy przebiegiem wielu uskoku i stwierdzeniami pokładów w otworach. Szczególnie ważne jest to w sąsiedztwie otworów wykazujących powtórzone stwierdzenia tego samego pokładu lub odwrócone następstwo pokładów (jak na rys. 10). Takie przypadki wymagały sprawdzenia indywidualnego. Wprowadzono korekty przebiegu uskoku, tak by zapewnić ich spójność ze stwierdzeniami pokładów w otworach.

Sztuczne otwory

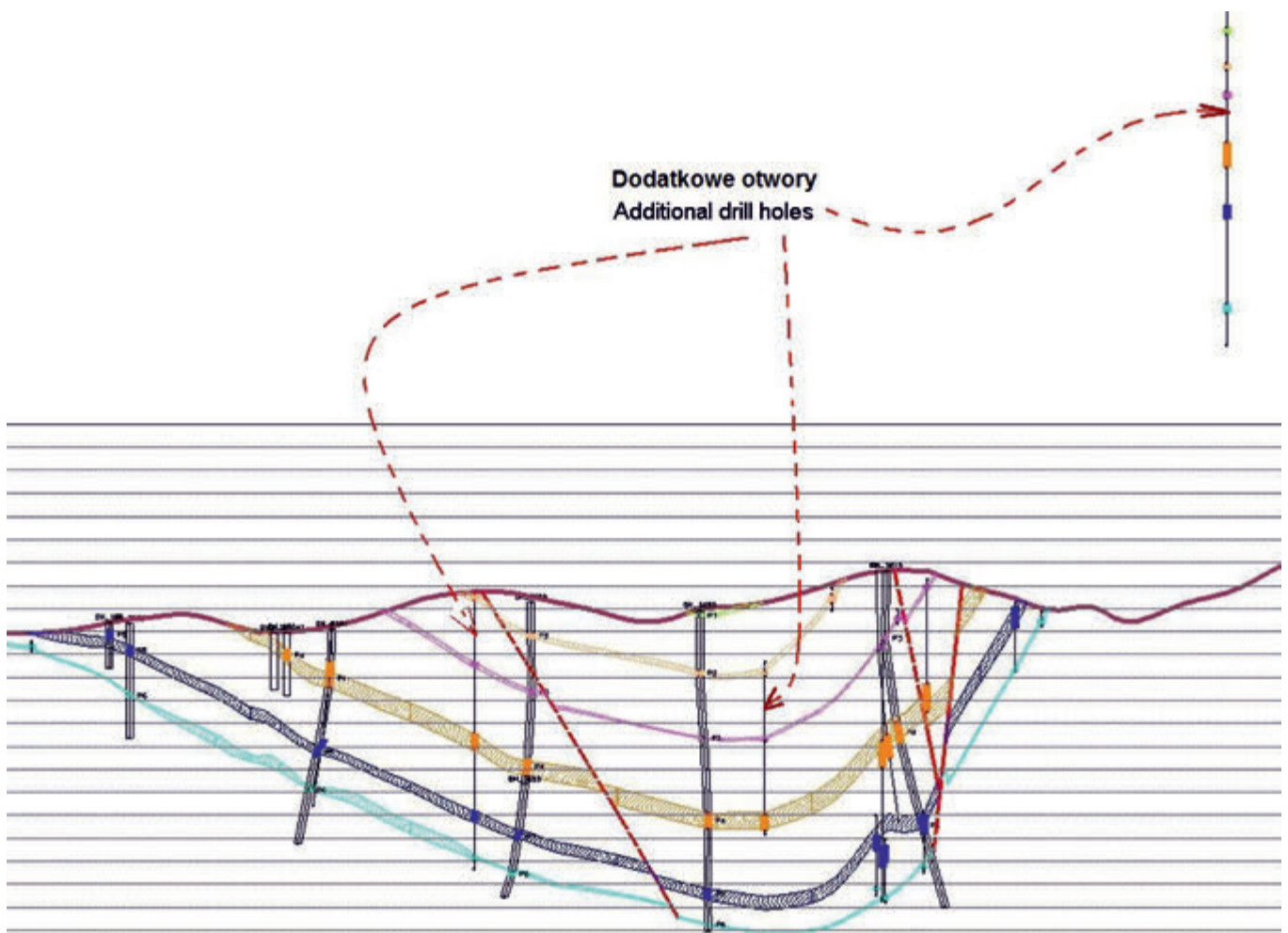
W celu zbudowania modelu zgodnego z interpretacją geologiczną zaproponowaną przez zleceniodawcę na ręcznie



Rys. 9. Interpretacja geologiczna zakładające różne zrzuty tego samego uskoku dla różnych pokładów
Fig. 9. Geological interpretation assuming various throw of same fault for various seams



Rys. 10. Wpasowanie przebiegu uskoków w stwierdzenia otworowe w sytuacji gdzie w danym otworze są powtórzone stwierdzenia tego samego pokładu
 Fig. 10. Fitting faults in the drill hole seams intersections where a particular drill hole shows two subsequent intersections of the same seam



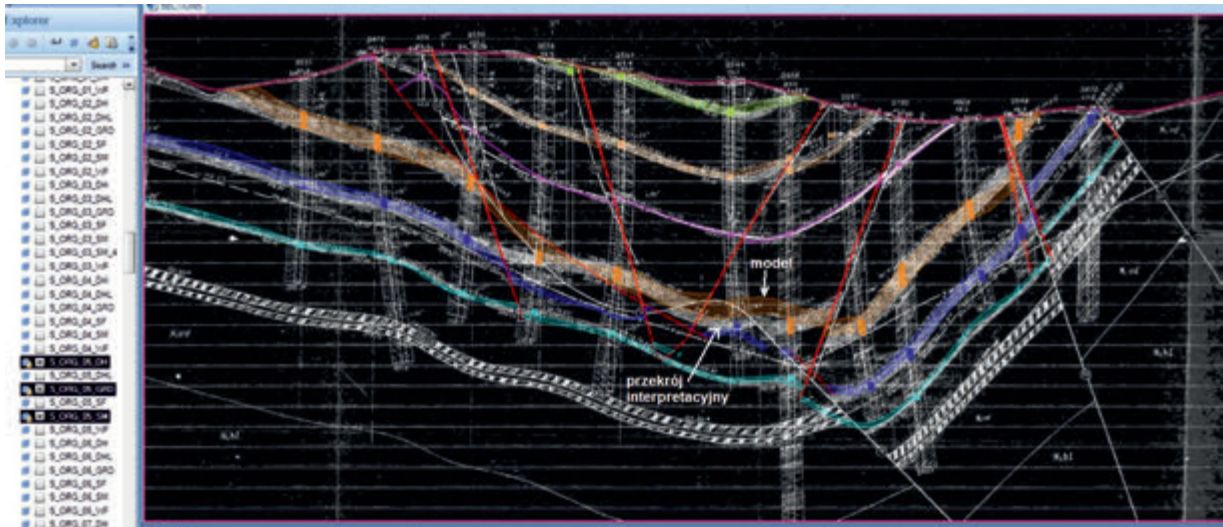
Rys. 11. Dodatkowe hipotetyczne otwory, wpływające na geometrię modelu
 Fig. 11. Example of additional fake drill holes providing the means of influencing the model geometry

stworzonych przekrojach, konieczne było wprowadzenie dodatkowych danych, których zadaniem było wymuszenie takiego, a nie innego przebiegu interpolowanych powierzchni stratygraficznych. Ręcznie stworzono dodatkowe punkty i umowne przecięcia pokładów przez hipotetyczne otwory, których zadaniem było umożliwić takie ułożenie pokładów w modelu, jakie zostało przedstawione na dostarczonych przekrojach interpretacyjnych.

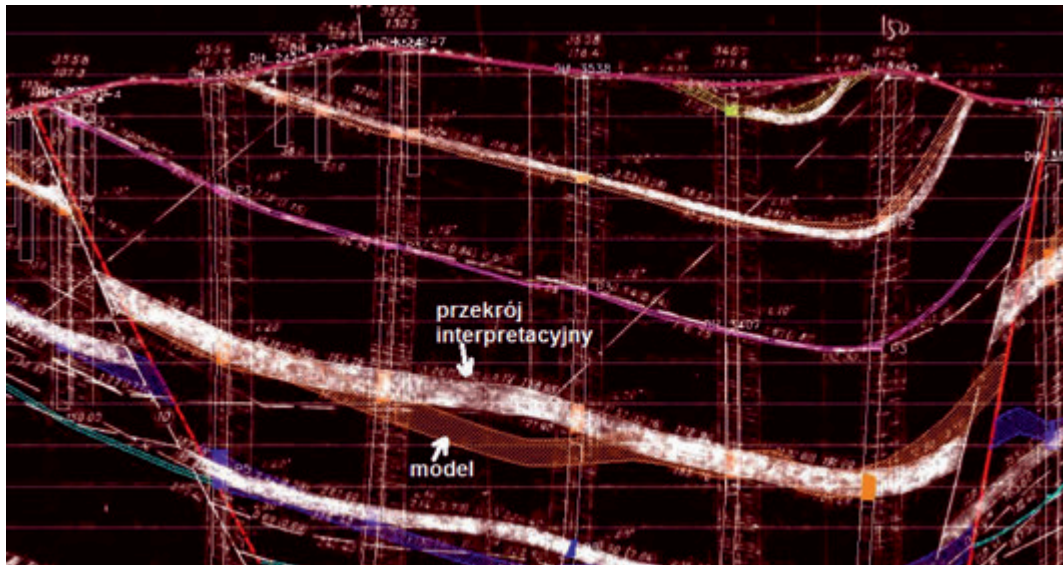
Wynik modelowania z użyciem oprogramowania

W wyniku modelowania z użyciem standardowych algorytmów interpolacji zawartych w oprogramowaniu powstał model, którego zgodność z koncepcją ułożenia pokładów i uskoków zaproponowaną na dostarczonych przekrojach interpretacyjnych była niezadowalająca.

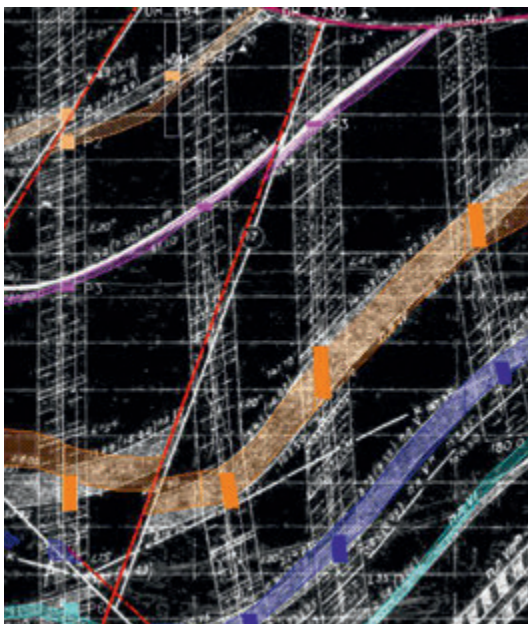
Przekroje z modelu



Rys. 12. Przekrój przez model wygenerowany przez oprogramowanie na tle przekroju interpretacyjnego stworzonego ręcznie
 Fig. 12. Cross section generated from the seams structural model shown along with the cross section provided as input data in form of raster image



Rys. 13. Przekrój przez model wygenerowany przez oprogramowanie na tle przekroju interpretacyjnego stworzonego ręcznie
 Fig. 13. Cross section generated from the seams structural model shown along with the cross section provided as input data in form of raster image

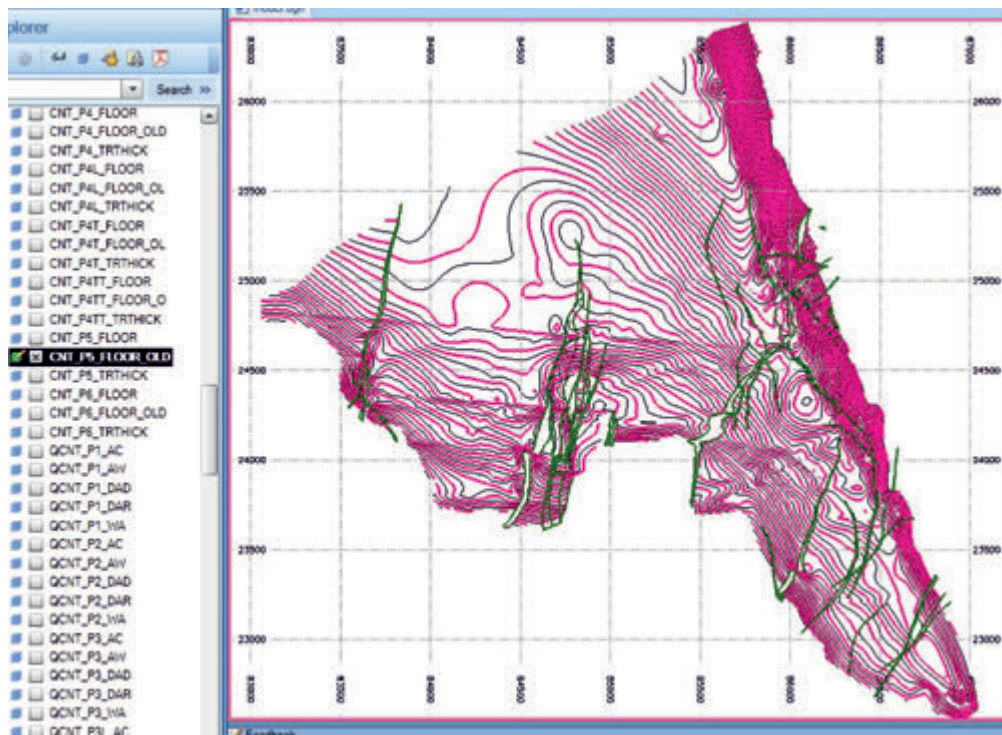


Rys. 14. Porównanie modelu z interpretacją geologiczną zakładającą różne zrzuty tego samego uskoku dla różnych pokładów
 Fig. 14. Comparison of model with geological interpretation assuming various throw of same fault for various seams

Izolinie z modelu

W oparciu o model stworzony przy pomocy oprogramowania i zawartych w nim algorytmów interpolacji wygenerowano plany warstwicowe powierzchni stropów i spągów pokładów. Na rysunku 15 przedstawiono ogólny widok izolinii rzędnych spągu jednego z pokładów (pokładu 5).

Wygenerowany model nie spełniał oczekiwaną zgodności z zaproponowaną przez zleceniodawcę koncepcją ułożenia pokładów i uskoku. Dodatkowe hipotetyczne otwory wprowadzone z zamiarem wymuszenia zgodności modelu z przekrojami interpretacyjnymi wprowadzały zafalowania modelowanych powierzchni. Te zafalowania spowodowane były bliskim sąsiedztwem uskoku, które wymuszały inną rzędną modelowanej powierzchni, niż ta wynikająca z takiego dodatkowego otworu. Próba ponownego wykonania modelu z wykorzystaniem algorytmów i reguł modelowania zawartych w oprogramowaniu nie rokowała zwiększenia jego zgodności z koncepcją udokumentowaną na dostarczonych przekrojach interpretacyjnych.



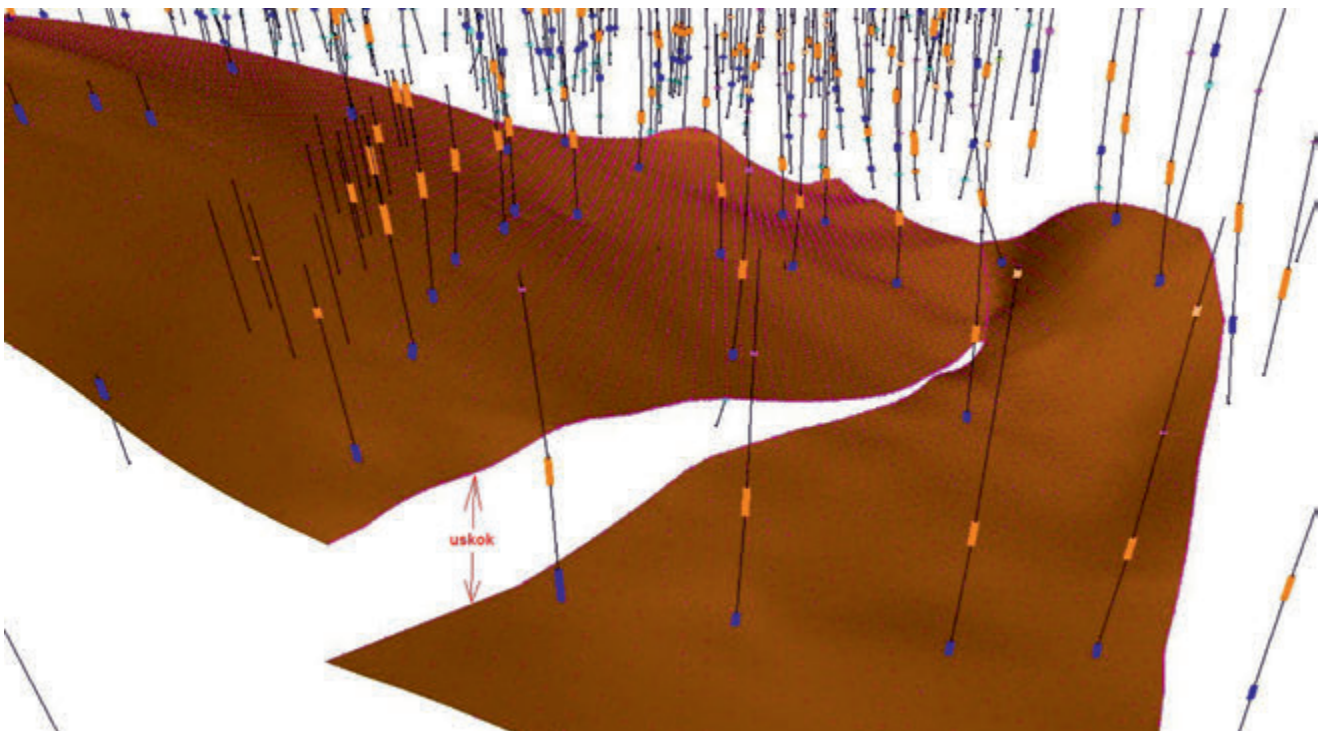
Rys. 15. Izolinie wygenerowane z modelu stworzonego przez algorytmy interpolacji zawarte w oprogramowaniu
 Fig. 15. Contour lines generated from model generated by interpolation algorithms included in the software

Nowa koncepcja modelowania

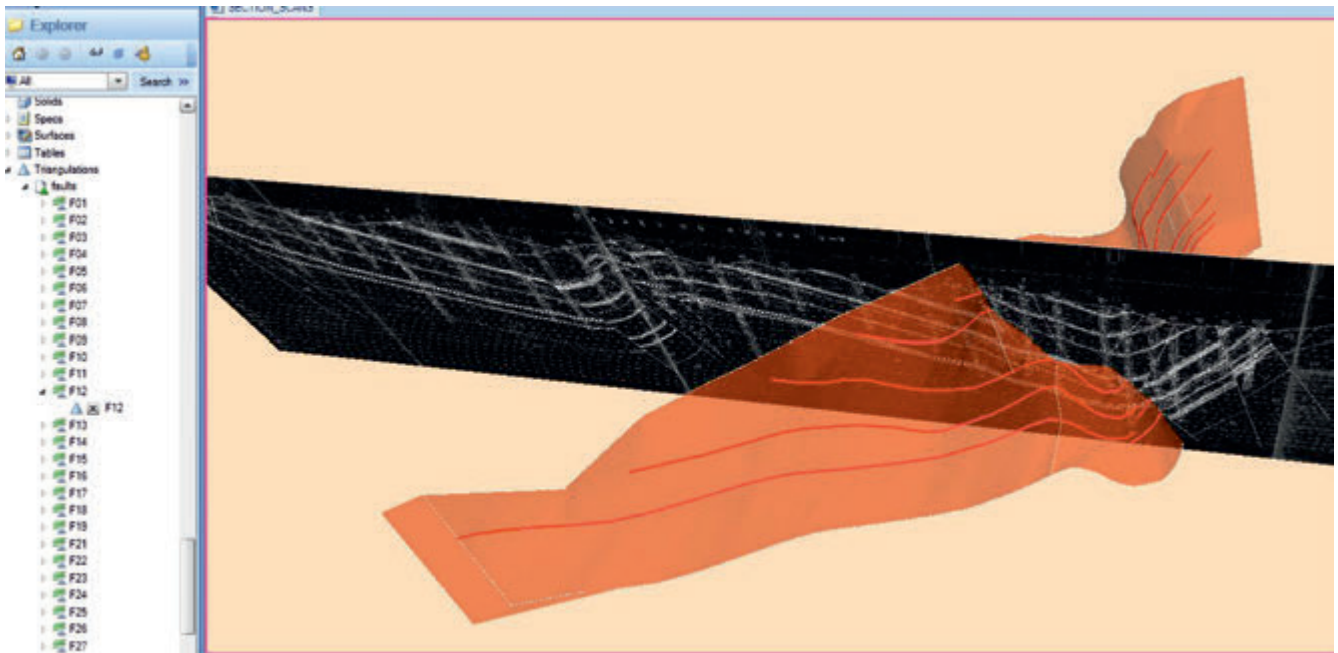
Alternatywny sposób wykonania modelu takich pokładów i uskoków, to modelowanie poszczególnych gładkich fragmentów powierzchni stropów i spągów pokładów. Model fragmentu spągu danego pokładu można wykonać na podstawie stwierdzeń otworowych pochodzących z tego obszaru. Suma takich gładkich parcel stanowi całkowity model danej powierzchni. Te gładkie parcele ograniczone są śladami (krawędziami) uskoków.

Na podstawie poszczególnych śladów uskoków na kolejnych powierzchniach stratygraficznych stworzono modele powierzchni uskokowych. Te powierzchnie wyznaczają granice parcel gładkich (niezaburzonych uskokami) powierzchni stropów i spągów pokładów.

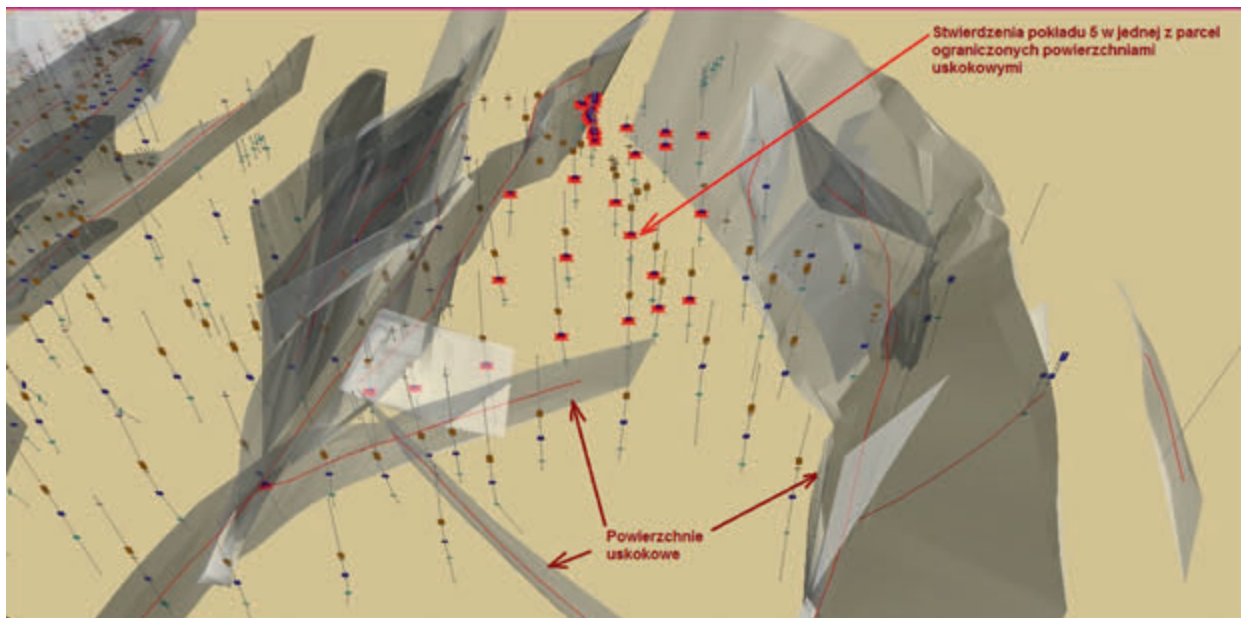
Stwierdzenia spągu pokładu pochodzące z obszaru niezaburzonego tektoniką, czyli z obszaru ograniczonego powierzchniami uskokowymi, można wykorzystać do stworzenia modelu powierzchni spągu danej parceli niezaburzonej. Rysunek 18 pokazuje powierzchnie uskokowe (kolor szary) oraz zaznaczone



Rys. 16. Gładkie parcele powierzchni spągu pokładu ograniczone uskokami – bloki niezaburzone uskokami
 Fig. 16. Smooth blocks of seam floor surface bounded by fault edge – un-faulted blocks



Rys. 17. Model powierzchni uskokowej oparty o ślady tego uskoku na spągach kolejnych pokładów
 Fig. 17. Model of fault surface based on the traces of this fault on floors of subsequent seams



Rys. 18. Stwierdzenia spągu pokładu 5 w jednej z parcel ograniczonych powierzchniami uskokowymi
 Fig. 18. Seam 5 floor intersection in one of the un-faulted areas bounded by the fault traces

wybrane stwierdzenia pokładu nr 5 (zaznaczone na czerwono) zawarte pomiędzy powierzchniami uskokowymi.

Na podstawie stwierdzeń pokładu znajdujących się w granicach modelowanego jego fragmentu pomiędzy śladami ograniczających uskoków, interpolujemy rzędne w węzłach regularnej siatki. W ten sposób otrzymujemy powierzchnię gładką parceli niezaburzonej uskokami. Siatka wyznaczana jest także na zewnątrz od przypuszczalnych granic gładkiej parceli.

Następnie konstruowana jest krawędź tej powierzchni gładkiej parceli z powierzchniami uskokowymi otaczających tę parcelę uskoków. W ten sposób powstają linie stanowiące fragmenty granicy parceli niezaburzonej (gładkiej).

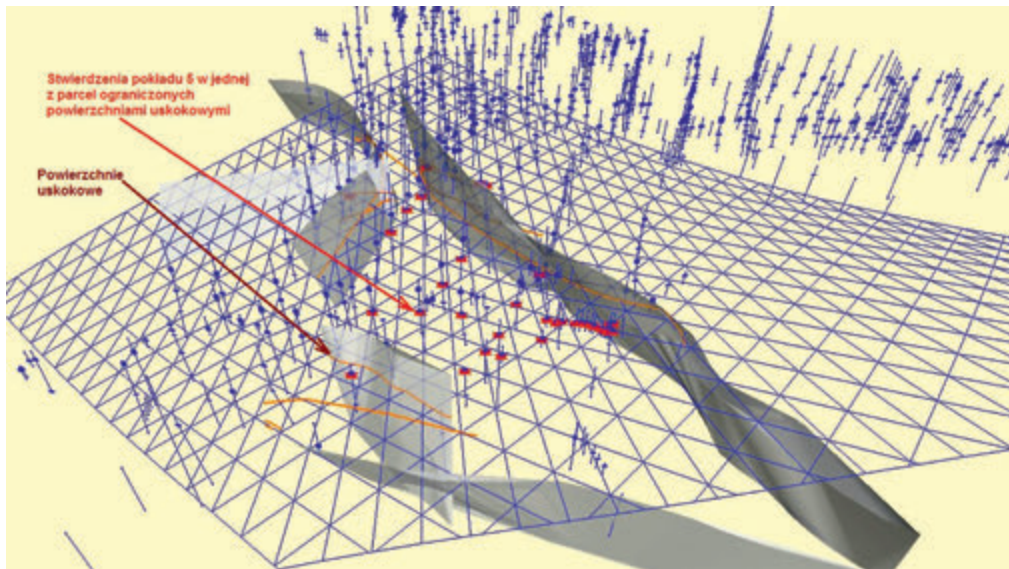
Skonstruowane fragmenty granicy parceli gładkiej są uzupełniane tak, by powstał zamknięty wielobok – ograniczenie parceli. Ten wielobok jest rzutowany pionowo na powierzchnię parceli. Tak powstaje granica pojedynczej parceli spągu pokładu. W oparciu o grację parceli wraz z węzłami siatki (grida)

powierzchni gładkiej parceli znajdującymi się wewnątrz tej granicy, tworzone są trójkąty i w ten sposób powstaje model trójkątowy parceli.

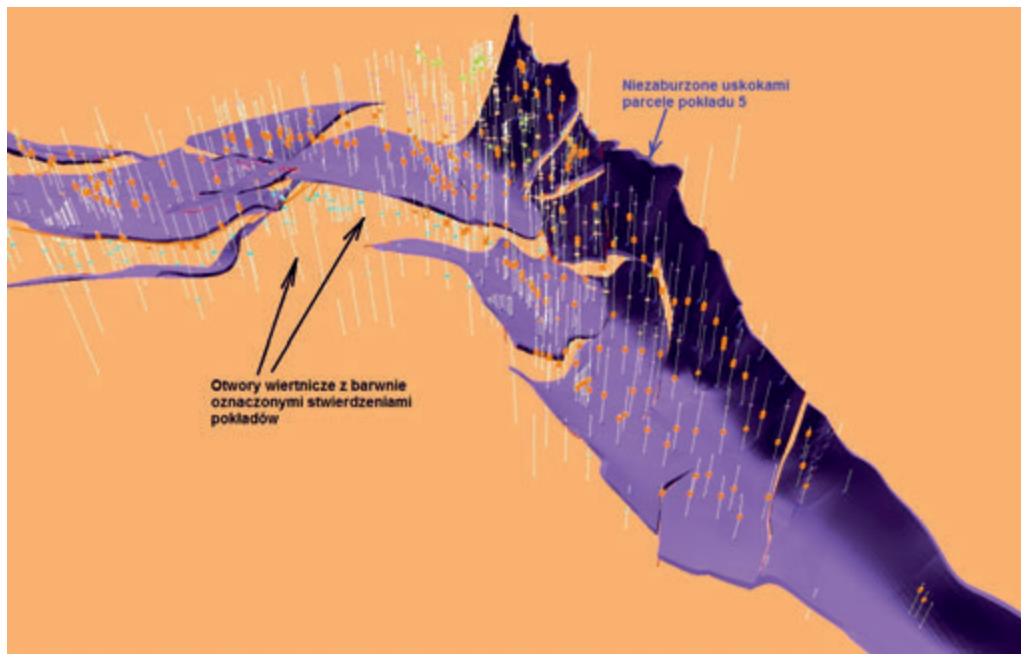
Na tym etapie parcela ciągle jeszcze nie jest ograniczona przez ewentualną powierzchnię erozyjną (np. powierzchnię terenu), która również jest częścią modelu.

W kolejnym kroku, o ile to konieczne, taka parcela jest przycinana do powierzchni erozyjnej.

Następnie w podobny sposób tworzony jest zestaw trójkątów określający geometrię stropu danej parceli. Przy tworzeniu powierzchni stropu, uwzględniany jest trend zalegania pokładu (modelu pokładu) wyznaczony przez wcześniej zamodelowaną powierzchnię spągu danej parceli. Uwzględnienie tego trendu realizowane jest za pomocą specjalnych funkcji zawartych w oprogramowaniu Ventyx MineScape™ (tj. interpolacji miąższości pokładu przy pomocy metody elementu skończonego MES czy też FEM).



Rys. 19. Siatka powierzchni parceli niezaburzonej, wraz ze stwierdzeniami otworowymi w jej obrębie
 Fig. 19. Smooth surface of un-faulted block and the drill hole seam intersections in the area of this block

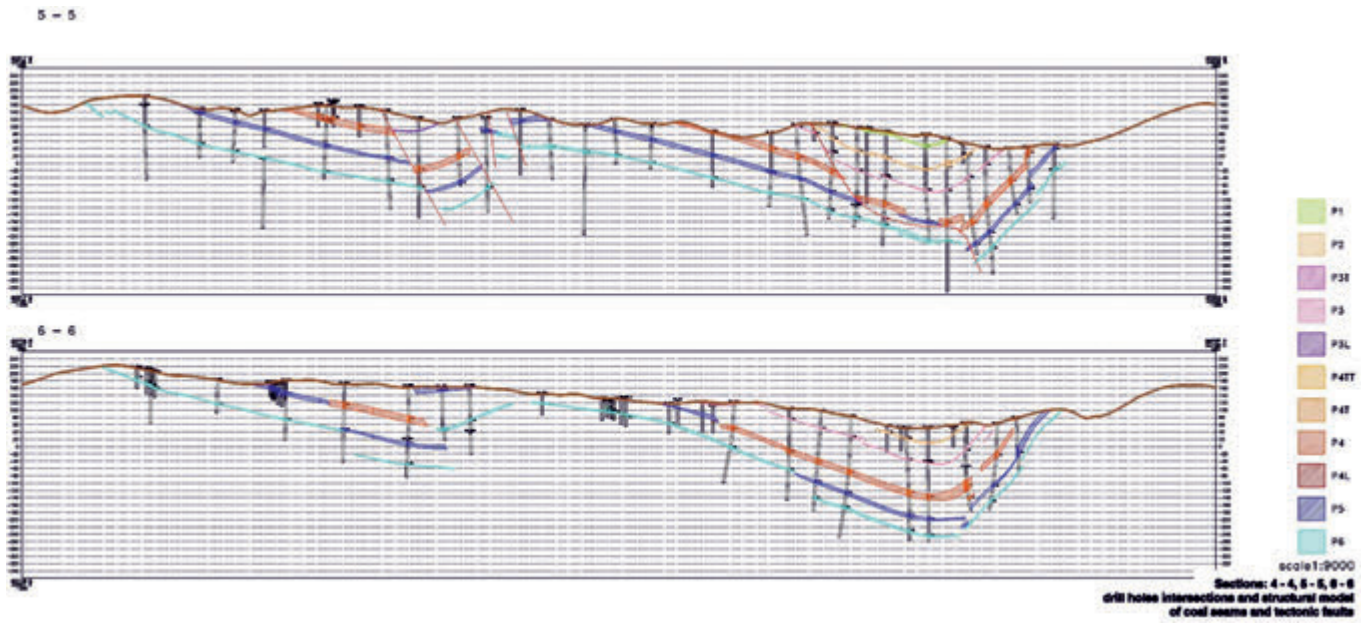


Rys. 20. Wszystkie niezaburzone parcele jednego z modelowanych pokładów (pokład 5)
 Fig. 20. All un-faulted blocks of a particular seam (seam 5)

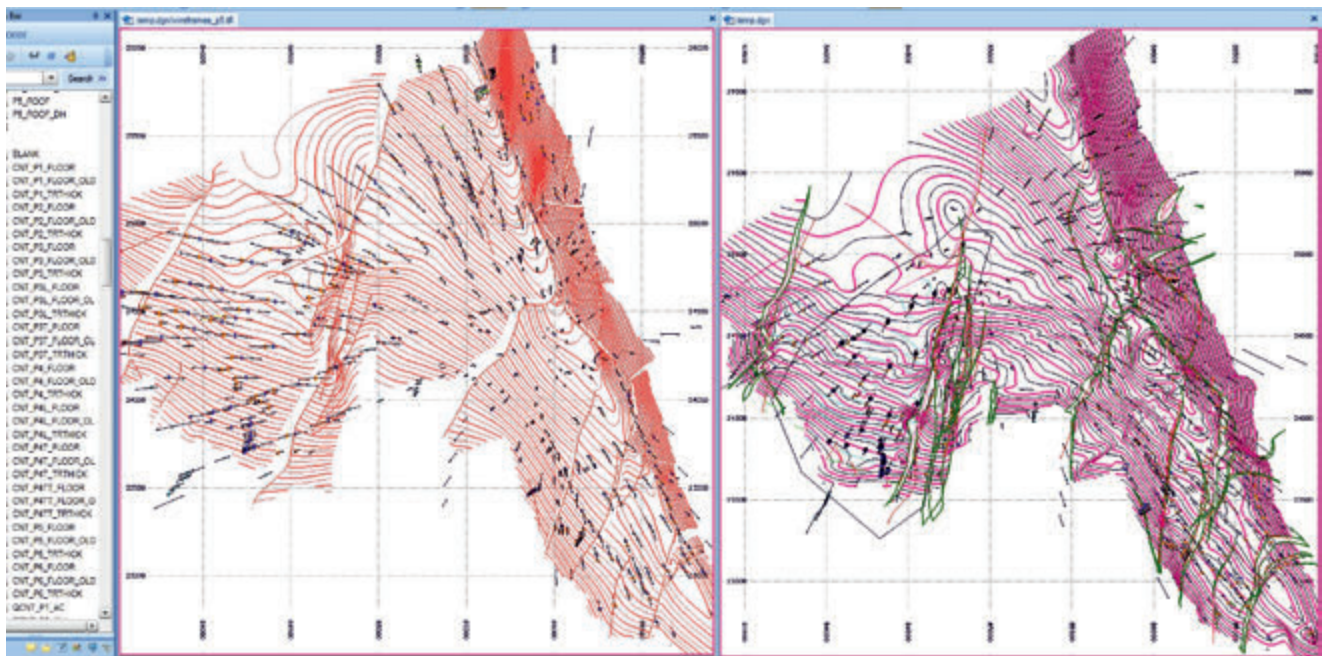
Używając tej metody stworzono modele wszystkich 32. parceli gładkich pokładu 5. Ten pokład to najlepiej udokumentowany pokład w całej serii modelowanych pokładów. Pozostałe pokłady (10 innych poza pokładem 5) zostały zamodelowane w taki sam sposób. Powierzchnia spągu pokładu 5 była każdorazowo użyta, jako powierzchnia nadająca trend tworzytom innym pokładom. Tak powstał model serii pokładów zalegających „współkształtnie” (konformistycznie). Izolinie wygenerowane z modelu stworzonego metodą kolejnych parceli gładkich (niezaburzonych uskokami) wykazują mniej zafalowań. Tak zamodelowana geometria pokładów w jest w pełni zgodna z interpretacją dostarczoną przez zleceniodawcę i jednocześnie nie wykazuje efektu nadmiernego falowania spowodowanego niespójnościami pomiędzy stwierdzeniami otworowymi i rzędnymi powierzchni wymuszonymi przez zrzuty uskoków.

Wnioski

Przy dużej ilości przecinających i rozgałęziających się uskoków o zmiennej rozciągłości, nachyleniu i wielkości zrzutów, modelowanie używając automatyki może dawać rezultat niezgodny z interpretowanym obrazem budowy złoża. Możliwe i prawdopodobne są zafalowania modelowanych powierzchni spowodowane interferencją pomiędzy stwierdzeniami otworowymi a zrzutami uskoków. Należy wówczas rozważyć zastosowanie opisaną tu metody modelowania, która daje większą kontrolę nad przebiegiem modelowanych powierzchni. Ta metoda wymaga większej uwagi i nakładu pracy, jednak eliminuje efekt nadmiernego deformowania modelowanych powierzchni, spowodowanego sposobem działania algorytmów i reguł modelowania zawartych w oprogramowaniu.



Rys. 21. Przekroje przez model stworzony metodą konstruowania kolejnych parceli gładkich
 Fig. 21. Cross sections through model created by constructing subsequent un-faulted blocks



Rys. 22. Izolinie spągu pokładu 5 wykonane dwoma metodami: metodą parceli gładkich (po lewej) i metodą zwykłej interpolacji i modelowania uskokuw automatem (po prawej)
 Fig. 22. Contour lines of seam 5 floor created with two methods: manual un-faulted block (on the left) and method of regular software algorithms for fault modeling (on the right)