

**INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ  
im. Henryka Niewodniczańskiego  
Polskiej Akademii Nauk  
ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków**

www.ifj.edu.pl/publ/reports/2009/

Kraków, czerwiec 2009

---

Raport Nr 2030/AP

**Numeryczne modelowanie wpływu niejednorodności  
otoczenia odwiertu poziomego na odpowiedź sondy  
gęstościowej gamma-gamma**

Tomasz Zorski<sup>1)</sup>, Urszula Woźnicka, Urszula Wiącek,  
Krzysztof Kowalik, Dominik Dworak

<sup>1)</sup> Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydz. Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Geofizyki,  
Kraków, al. Mickiewicza 30

Praca wykonana w ramach wspólnych badań Naukowej Sieci Tematycznej: „*Nowe aplikacje w zakresie udostępniania i eksploatacji złóż węglowodorów otworami kierunkowymi i poziomymi*”, w okresie 18.10.2008 – 15.03.2009, koordynator: Instytut Nafty i Gazu, Kraków, ul. Lubicz 25a.

**Numerical modeling of influence of horizontal borehole surrounding  
heterogeneity on the response of the gamma-gamma density tool**

**Abstract**

The response of the spectrometric gamma-gamma density tool in borehole conditions has been numerically simulated. A transport of gamma rays from a point source situated in a borehole tool through the rock medium to the detectors has been simulated using the MCNP code. An influence of heterogeneity of a rock medium surrounding the borehole on the response of detectors in the probe has been examined. The heterogeneity results from the presence of the interface between two different geological layers parallel to the borehole axis. Such conditions happen in horizontal logging practice when the borehole is drilled along the boundary of geological layer. It is possible to assess the distance from the boundary on the basis of the response of the gamma-gamma density tool, using the classic interpretation procedure “spine&ribs. We take advantage of the effect of different densities of the bordered layers. When the boundary is far-away the response of the probe fits to the “spine” curve and when the boundary is close – the response fits to the “rib”.

The presented examples show the wide possibilities of numerical modeling of the complex borehole geometry and of applications to solve difficult interpretation problems of the nuclear borehole logging.

## Streszczenie

W pracy przedstawiono przykłady odpowiedzi spektrometrycznej sondy gęstościowej gamma-gamma w otworze przecinającym złożony ośrodek skalny uzyskane metodą symulacji komputerowych. Obliczenia numeryczne przeprowadzono przy zastosowaniu programu komputerowego MCNP (*Monte Carlo N – Particle Transport Code*), służącego do symulacji zjawisk oddziaływania promieniowania jądrowego pochodzącego z zadanego źródła (tu: źródła kwantów gamma) w szczegółowo wymodelowanym ośrodku materialnym składającym się z sondy, odwiertu i otaczającego go ośrodka skalnego. Celem obliczeń było zbadanie, jak spektrometryczna sonda gęstościowa gamma-gamma reaguje na niejednorodność wynikającą z obecności płaskiej granicy warstw przebiegającej równolegle do osi otworu. Z przypadkiem takim spotykamy się podczas profilowania otworu poziomego. Wykonane obliczenia pokazują, że stosując tradycyjną formę wykresu „spine & ribs” jesteśmy w stanie oceniać, czy otwór wiertniczy znajduje się w pobliżu takiej granicy, przy założeniu, że na wskazania sondy nie wpływają innego typu niejednorodności. Sygnałem zbliżania się otworu do granicy warstw o różnych gęstościach jest położenie punktów o współrzędnych wskazań detektora bliskiego i dalekiego, zestawionych w formie nomogramu „spine & ribs”, na krzywych „ribs” odległych od krzywej „spine”.

Praca pokazuje szerokie możliwości stosowania obliczeń numerycznych przy użyciu programu MCNP dla potrzeb rozwiązywania problemów interpretacyjnych pomiarów otworowych wykonywanych jądrowymi sondami geofizycznymi.

## 1. Wprowadzenie

W ciągu ostatnich 20 lat technologia wierceń osiągnęła taki poziom, że kierunkowe i poziome wiercenia stały się powszechne. Pierwszy odwiert komercyjny ukończono w Europie w 1983 r., a już w roku 1990 istniało 1290 otworów, większość w USA. Kierunkowe i poziome otwory wiertnicze są obecnie powszechnie odwiercane i często zestaw profilowań służy nie tylko interpretacji geofizycznej, ale również do sterowania wierceniem (geosteering) w określonym celu. Często otwory kierunkowe penetrują strefy lub części skał zbiornikowych, których osiągnięcie pionowym odwiertem jest niemożliwe. W tych sytuacjach wykonane profilowania są stosowane do rutynowej interpretacji porowatości i nasycenia określonym medium.

Porównania wyników interpretacji profilowań w danej formacji, wykonanych w otworze pionowym i w otworze kierunkowym wskazują, że mogą występować znaczące różnice (Zorski i in., 2008). Przykładowo, w pracy (Passey i in., 2005) pokazano, że wartości porowatości mogą różnić się do 6 p.u., niepewność wyznaczenia nasycenia wodą może sięgać 50 %, a grubość interwału stratygraficznego może się różnić o 200, a nawet 300 %, z powodu niedokładności wyznaczenia pozornego upadu warstw w silnie nachylonych otworach. Tak więc rutynowa metodyka stosowana do oceny złóż, stosowana w otworach pionowych, może nie być odpowiednia dla dokładnej charakterystyki formacji i płynów złożowych w otworach kierunkowych.

Zależności geometryczne pomiędzy odwiertem i uwarstwieniem formacji mają znaczący wpływ na odpowiedź sondy. W pionowych odwiertach sonda pomiarowa jest na ogół ustawiona prostopadle do powierzchni pokładu i uwarstwienia. W odwiertach kierunkowych sonda pomiarowa jest często ułożona równolegle lub prawie równolegle do pokładu i uwarstwienia. Poprawna interpretacja profilowań jest skomplikowana przez konieczność uwzględniania efektów granic złóż, filtracji, obecności otworu i innych wpływów otoczenia.

Generalnie, wartości gęstości i porowatości obserwowane w odwiertach kierunkowych są większe lub równe odpowiednim wartościom obserwowanym w otworach pionowych.

Na efekt zawyżania tych parametrów może wpływać szereg czynników: wymywanie odwiertu, obecność zwiercin o niskiej gęstości w spodniej części odwiertu, uśrednienie odpowiedzi po obwodzie odwiertu, niedokładny docisk sondy, anomalna strefa filtracji. W 1992 roku Singer (Singer, 1992) przedstawił wyniki modelowania gęstościowej sondy

promieniowania gamma i sondy neutronowej w silnie nachylonych odwiertach przecinających równoległe warstwy. Stwierdził, że profilowania jądrowe są użyteczne dla oceny położenia odwiertu w stosunku do granic warstw i dla rozstrzygnięcia, czy granice znajdują się od góry czy od dołu odwiertu. To podejście jest obecnie szeroko stosowane do sterowania wierceniem, ale niewiele zostało zrobione pod kątem ilościowej interpretacji penetrowanych interwałów. W wielu przypadkach jakościowy charakter odpowiedzi sondy jest poprawny, ale absolutne wartości są błędne. W badaniach przeprowadzonych na złożach na Morzu Północnym (Bedford i in., 1997) stwierdzono, że przy silnie nachylonych odwiertach obserwowane są zawyżone wartości gęstości objętościowej (porowatość pozorna rosła z wzrostem kąta nachylenia odwiertu). Jako możliwe przyczyny uznano asymetrię filtracji, grawitacyjną segregację filtratu i wpływ zwierciny. Ostatnio, mimo znacznego postępu (zwłaszcza w LWD) w ostatniej dekadzie, podobne problemy są dalej obserwowane.

W pracy (Passey i in., 2005) przedstawiony jest przykład wyników profilowania porowatości dla zbiornika piaskowcowego wypełnionego ropą z dziewięciu odwiertów wywierconych pod różnymi kątami. Dla tego złoża średnia porowatość wyznaczona z profilowania w większości odwiertów jest ok.  $28 \div 30$  p.u., co jest zgodne z pomiarami na rdzeniach: 29.5 p.u. Jednakże, gdy kąt nachylenia przekracza  $80^\circ$ , wartości porowatości są znacząco wyższe od wartości średniej, choć zdarzają się również takie, które są w dobrej zgodności z pomiarem na rdzeniach. Szczegółowa interpretacja dla tego złoża, uzyskana z profilowania otworu pionowego daje średnią wartość porowatości 29.5 p.u., podczas gdy średnia wartość porowatości w otworze poziomym została wyznaczona na 34.5 p.u. Charakter profilu poziomego nie wskazuje na jakiś oczywisty powód, sugerujący, że wartości porowatości są wątpliwe, ale jednak ta porowatość jest ok. 5 p.u. za wysoka.

Obecnie techniki matematycznego modelowania odpowiedzi sond jądrowych są bardzo rozwinięte. Podstawowym narzędziem umożliwiającym wykonanie zaawansowanych i obszernych obliczeń dla otworowych sond wykorzystujących źródła neutronowe lub źródła promieniowania gamma jest program MCNP (Monte Carlo N – Particle Transport Code), pozwalający na symulowanie komputerowe zjawisk oddziaływania promieniowania jądrowego w ośrodku materialnym.

W pracy przedstawiono przykład modelowania numerycznego odpowiedzi sondy gęstościowej gamma-gamma umieszczonej w poziomym otworze, równoległym do granicy warstw. Zbadano wpływ odległości granicy warstw od ściany odwiertu na odpowiedź sondy. Obliczenia numeryczne przeprowadzono przy zastosowaniu programu komputerowego MCNP, służącego do symulacji zjawisk oddziaływania promieniowania jądrowego

pochodzącego z zadanego źródła (tu: źródła kwantów gamma) w szczegółowo wymodelowanym ośrodku materialnym składającym się z sondy, odwiertu i otaczającego go ośrodka skalnego. Wykonane obliczenia pokazują, że stosując tradycyjną formę wykresu „spine & ribs”, stanowiącego podstawową metodę interpretacji gęstościowego profilowania gamma jesteśmy w stanie ocenić, czy otwór wiertniczy znajduje się w pobliżu granicy, przy założeniu, że na wskazania sondy nie wpływają innego typu niejednorodności. Sygnałem zbliżania się otworu do granicy warstw o różnych gęstościach jest położenie punktów o współrzędnych wskazań detektora bliskiego i dalekiego, zestawionych w formie nomogramu „spine & ribs”, na krzywych „ribs” odległych od krzywej „spine”.

Praca pokazuje szerokie możliwości stosowania obliczeń numerycznych przy użyciu programu MCNP dla potrzeb rozwiązywania problemów interpretacyjnych pomiarów otworowych wykonywanych jądrowymi sondami geofizycznymi.

Specyfika otworów kierunkowych znacząco wpływa na możliwości wykonywania pomiarów geofizycznych. Badania prowadzone w takich otworach wymagają odmiennej metodyki pomiarowej i interpretacyjnej. Zwięzły opis w języku polskim problematyki pomiarów geofizycznych w otworach kierunkowych zawiera opracowanie monograficzne pod redakcją Urszuli Woźnickiej [2008]. Podstawową przyczyną odmiennego środowiska, jakie panuje w otworach kierunkowych, jest wpływ siły grawitacji działającej poprzecznie do osi otworu, co skutkuje m.in.:

- ułożeniem sondy w innych pozycjach niż w otworze pionowym,
- rozwarstwianiem płuczki,
- tworzeniem się stref filtracji o układzie radialnie asymetrycznym w stosunku do osi otworu,
- segregacją grawitacyjną urobku w otworze.

Innym czynnikiem różniącym otwory kierunkowe od tradycyjnych jest wpływ geometrycznego układu warstw skał. W otworach kierunkowych brak jest symetrii radialnej w stosunku do wszystkich zasięgów sond. W otworach pionowych najczęstszym przypadkiem jest zbliżone do prostopadłego ( $\pm 30^\circ$ ) ułożenie osi otworu w stosunku do uwarstwienia. W takich warunkach przyjmuje się (z domyślnym marginesem błędu), że podstawowe parametry fizyczne skały, takie jak oporność elektryczna, gęstość, porowatość, skład mineralny itp. zachowują się podobnie we wszystkich kierunkach radialnych wokół osi otworu. Sytuacja ulega zdecydowanej zmianie, gdy kąt osi otworu do płaszczyzn

uwarstwienia spada poniżej ok. 45°, aż do przebiegu równoległego. W rezultacie oznacza to utratę symetrii osiowej pomiarów.

Pomiary geofizyczne mogą być realizowane w dwóch wariantach:

1. W trakcie wiercenia – sonda będąca jednocześnie częścią przewodu wiertniczego, umieszczona jest za świdrem i silnikiem wgłębnym (ang.: *logging while drilling*, LWD). W trakcie profilowań techniką LWD, w zależności od sposobu napędzania świdra, sonda obraca się razem z całym przewodem wiertniczym, gdy obroty nadawane są na powierzchni, lub się nie obraca, gdy świder napędzany jest silnikiem wgłębnym (tzw. turbowiertem – turbiną zasilaną strumieniem przepływającej płuczki) umieszczonym tuż za świdrem. W takich sytuacjach zasilanie sondy jak i gromadzenie pełnych danych pomiarowych odbywa się w modułach towarzyszących sondzie, zaś część danych przesyłana jest bieżąco na powierzchnię technikami polegającymi na wprawianiu płuczki w odpowiednio zakodowane wibracje.
2. Pomiar wykonany po wyciągnięciu świdra – pomiar kablowy. Zwykła sonda kablowa zostaje zapuszczona do otworu przy pomocy przewodu wiertniczego, do którego jest przymocowana na sztywno w miejscu świdra, a sygnał pomiarowy i zasilanie przesyłane jest kablem geofizycznym, który na pewnym odcinku prowadzony jest wewnątrz przewodu wiertniczego (ang.: *drill-pipe-assisted*). W takiej sytuacji przewód wiertniczy nie obraca się, choć możliwe jest kątowe korygowanie położenia sondy wokół ścianki otworu.

Opisane warunki pomiarowe wymagają znajomości i oceny wpływu niejednorodności radialno – kątowych na profilowania geofizyczne. Niejednorodności te muszą być brane pod uwagę przy wyznaczaniu własności zbiornikowych badanych utworów, niezależnie od ukierunkowania otworu, natomiast w przypadku pomiarów LWD - do sterowania wierceniem. W tym drugim przypadku kluczową rolę odgrywa ocena położenia otworu w przewiercanym ośrodku w stosunku do granicy z sąsiednią warstwą. Szczególną rolę w tym zakresie odgrywają sondy gamma – gamma, służące do pomiaru gęstości i indeksu absorpcji fotoelektrycznej. Tego typu pomiary, ze względu na stosunkowo niewielki zakres penetracji skały, z założenia są pomiarami kolimowanymi, nawet w warunkach pomiarów kablowych w otworach pionowych. Połączenie zatem tego typu pomiarów z kontrolowanym obrotem sondy wokół ścianki otworu umożliwia skanowanie najbliższych stref przyotworowych pod względem zmian gęstości i indeksu  $P_e$ .

## 2. Gęstościowa sonda spetrometryczna $\gamma - \gamma$

Zasięg kwantów gamma emitowanych przez źródła stosowane w sondach geofizycznych jest na tyle mały, że już na etapie ich konstrukcji projektowane są rozwiązania umożliwiające redukcję wpływu otworu wiertniczego i strefy przyotworowej na odpowiedź sondy. Jednym z takich rozwiązań jest umieszczenie detektorów i źródła na krótkim wysięgniku (ang.: *pad*) mocno dociskanym do ścianki otworu przez decentralizator, będący jednocześnie ramieniem kawernomierza sondy. Promieniowanie wychodzące ze źródła i docierające do objętości czynnej detektora jest silnie kolimowane przez odpowiednio ukształtowane osłony wolframowe, kierujące zarówno emitowane jak i rejestrowane promieniowanie w stronę (i od strony) skały. Połączenie tego mechanicznego rozwiązania z użyciem dwóch detektorów (bliskiego w odległości ok. 15 cm, a dalekiego ok. 35 cm od źródła) i odpowiedniej metody przeliczania ich wskazań (technika „spine & ribs”) pozwala na rozdzielenie sygnału sondy na strefę bliższą (3 - 5 cm) i dalszą (powyżej 3 - 5 cm). [Wahl et al., 1964]. Podstawowymi elementami układu pomiarowego sondy są:

- Obudowa wysięgnika (padu) sondy - wykonana z wolframu ekranującego elementy sondy od wpływu otworu i kolimująca promieniowanie.
- Źródło  $^{137}\text{Cs}$ , emitujące promieniowanie gamma o energii 0,662 MeV.
- Detektory bliski i daleki. Są to liczniki scyntylacyjne z kryształami NaJ(Tl), z których pierwszy (mniejszy) ulokowany jest bliżej źródła, a drugi (większy) – dalej. Detektory mogą pracować w reżimie spetrometrycznym i wówczas sonda może mierzyć nie tylko gęstość, lecz także indeks absorpcji fotoelektrycznej.

Dla potrzeb otworów kierunkowych na przewodzie wiertniczym (LWD) mechaniczna konstrukcja sondy znacząco odbiega od sondy kablowej, nie ulega jednak zmianie jej podstawowa idea jak i współdziałanie wyżej omówionych elementów. Główne zmiany mechaniczne narzucone są przez konieczność umieszczenia elementów sondy w ściance rury stanowiącej element przewodu wiertniczego. W pierwszej kolejności, z punktu widzenia jakości pomiarów, negatywnym skutkiem jest brak możliwości zastosowania wysięgnika (padu), eliminującego lokalne zmiany średnicy otworu. Oznacza to, że pomiędzy powierzchnią sondy a skałą pojawiać się będzie przestrzeń wypełniona płuczką lub zwiercinami skały, zaburzająca wyniki pomiaru. Eliminacja tego efektu osiągnana jest co najmniej trzema sposobami. Pierwszy, mechaniczny, polega na nakładaniu na sondę, stanowiącą element przewodu wiertniczego, tzw. stabilizatorów, czyli co najmniej

4 metalowych szyn rozłożonych symetrycznie wokół rury pomiarowej, zwiększając jej zewnętrzną średnicę. Wewnątrz jednej z tych szyn, ulokowanej dokładnie przy układzie źródło – detektory znajdują się kanały prowadzące promieniowanie ze źródła do skały i ze skały do detektorów, co odgrywa rolę dodatkowej kolimacji i zmniejsza szczelinę pomiędzy sondą a skałą. Drugi sposób – obliczeniowy - wykorzystuje procedurę „spine & ribs” [Spross et al., 1995], gdzie za strefę bliską przyjmuje się szczelinę pomiędzy sondą a skałą, co pozwala eliminować jej wpływ na wyznaczaną gęstość skały. Trzecie podejście polega na wybieraniu do określania gęstości tych odczytów, dla których pomierzony czujnikami akustycznymi odstęp sondy od skały jest minimalny [Moake et al., 1996; Spross et al., 1993].

Pomiar gęstości ośrodka należy do profilowań geofizycznych wykonywanych standardowo, zarówno w otworach pionowych jak i kierunkowych. Informacje dostarczane z pomiarów gamma – gamma służą przede wszystkim do wyznaczania porowatości, a także do wstępnej identyfikacji litologicznej, w tym określania zailenia oraz do korelacji między-otworowej. W otworach kierunkowych przy pomiarach na przewodzie wiertniczym (LWD) pomiary gamma – gamma służą także do obrazowania kątownego strefy przyotworowej [Holenka et al., 1995; Radtke et al., 2003].

### **2.1. Zasada kalibracji gęstościowej sondy $\gamma - \gamma$**

Kalibracja sondy jest procedurą służącą do określenia związku pomiędzy wskazaniami sondy a badanymi parametrami skały. Kalibracja musi uwzględniać zarówno główny wpływ mierzonego parametru, jak i wpływy zniekształcające pochodzące od różnych pobocznych czynników. W przypadku omawianej sondy  $\gamma - \gamma$  przedstawia się to następująco:

- Parametrami głównymi, których określenie jest celem kalibracji, są gęstość objętościowa skały i indeks absorpcji fotoelektrycznej  $P_e$ .
- Grupa czynników związanych z wpływem otworu i warstw otaczających. W przypadku tego typu sond bezpośredni wpływ otworu jest eliminowany przez układ kolimacyjny, eliminujący praktycznie w całości wpływ zmian średnicy otworu. Pozostają jednak efekty niejednorodności radialnej i pionowej. Efekty zmian radialnych eliminowane są przez zastosowanie techniki „spine & ribs”, podczas gdy zmiany pionowe wymagają stosowania dekonwolucji, do której użycia konieczna jest znajomość funkcji odpowiedzi pionowej sondy (VRF).



Istnieją trzy sposoby kalibracji sond: empiryczny, numeryczny (teoretyczny) oraz półempiryczny. Pierwszy wymieniony rodzaj wymaga posiadania stanowiska kalibracyjnego. Jest to, jak dotychczas, podstawowa i najbardziej wiarygodna metoda kalibracji stosowana przez wszystkie główne firmy konstruujące sprzęt geofizyki wiertniczej. Jest jednak metodą drogą i z tego względu ograniczoną do badania podstawowych parametrów. Jedno z nielicznych takich stanowisk zlokalizowane jest w Bazie Geofizyki Wiertniczej w Zielonej Górze (Geofizyka Kraków Sp. z o.o.) [Zorski i Massalski, 1997]. Zgromadzono tam z jednej strony naturalne bloki skalne, charakteryzujące się różnymi wielkościami porowatości, gęstości i składu mineralnego przewiercone otworami o różnej średnicy, z drugiej zaś sztuczne modele ceramiczne do badania funkcji odpowiedzi głębokościowej sond gęstościowych i neutronowych. Podstawą każdego stanowiska kalibracyjnego jest możliwie pełna wiedza na temat własności ośrodków kalibracyjnych.

Metoda numeryczna cechowania sond otworowych, polega na przeprowadzeniu symulacji komputerowej odpowiedzi sondy w wymodelowanym ośrodku skalnym. Podstawowym narzędziem umożliwiającym wykonanie tak zaawansowanych i obszernych obliczeń dla otworowych sond wykorzystujących źródła neutronowe lub źródła promieniowania gamma jest program MCNP, pozwalający na symulowanie komputerowe zjawisk oddziaływania promieniowania jądrowego w ośrodku materialnym. Program bazuje na metodzie Monte Carlo, pozwalającej na przeprowadzenie losowania prawdopodobieństwa zajścia odpowiednich zjawisk fizycznych (np. w przypadku transportu promieniowania gamma: absorpcji fotoelektrycznej, zjawiska Comptona, zjawiska tworzenia par). Możliwość ta wynika ze stochastycznego charakteru transportu cząstek (neutronów, fotonów, elektronów) w ośrodku. Metody numeryczne posiadają ogromny potencjał, ponieważ umożliwiają, z bardzo dobrym przybliżeniem, wykonanie symulacji pomiarów geofizycznych sond jądrowych. Zaletą tego typu kalibracji jest to, że przeprowadza się ją w środowisku całkowicie znanym – wszystkie parametry (porowatość, skład pierwiastkowy skały, położenie sondy, zasięg stref zmienionych, średnica otworu) zadawane są precyzyjnie i jednoznacznie. Następstwem tego jest pełna dowolność w wyborze ośrodka, w którym przeprowadzana jest kalibracja – w odróżnieniu od metody empirycznej nie trzeba dysponować odpowiednim blokiem skalnym. Nieodzownym elementem kalibracji numerycznej jest wykonanie obliczeń dla serii przypadków odpowiedzi sondy znanych z rzeczywistych eksperymentów wykonanych na stanowisku kalibracyjnym. Współczynnik korelacji obliczonych i zmierzonych odpowiedzi detektorów sondy jest miarą poprawności obliczeń numerycznych. Obliczenia symulacyjne metodą Monte Carlo stanowią już od wielu lat potencjalne

uzupełnienie kalibracji empirycznej dla przypadków trudnych do osiągnięcia na drodze eksperymentu fizycznego. Rola tej metody stale rośnie w miarę - z jednej strony pojawiania się coraz szybszych procesorów komputerowych i udoskonalania oprogramowania, z drugiej zaś - wobec rosnących oczekiwań interpretacji pomiarów wykonywanych w coraz trudniejszych ośrodkach, zarówno pod względem składu mineralnego jak i geometrii. Przykładem takich nowych wyzwań interpretacyjnych są pomiary w otworach kierunkowych.

Ostatni, półempiryczny sposób cechowania sond polega na łączeniu niektórych parametrów opisujących teoretycznie rozkład pól promieniowania z własnościami ośrodków skalnych, w których wykonano pomiary doświadczalne. Ten typ kalibracji, rozwinięty głównie przez prof. Jana A. Czubka [Czubek, 1992] dla sond neutronowych, pozwala nie tylko na kontrolowaną, zgodnie ze zjawiskami fizycznymi rządzącymi transportem promieniowania, interpolację wyników kalibracji pomiędzy doświadczalnymi punktami pomiarowymi, ale też w znacznym stopniu na ich ekstrapolację w zakresy nie objęte pomiarami. Metoda ta jest aktualnie wykorzystywana dla sond neutronowych, których proces kalibracji jest najbardziej skomplikowany. Pierwsze jednak prace jak i idea tego typu kalibracji powstała dla sond  $\gamma - \gamma$  [Czubek, 1966].

Aktualnie prezentowana praca, którą możemy zaliczyć do procesu kalibracyjnego, jest przykładem zastosowania w pełni teoretycznego podejścia, co wynika z potrzeby odpowiedzi na pytania dotyczące wpływu geometrii układu warstw poziomych i poziomego otworu przebiegającego w sąsiedztwie granicy warstw. Badanie doświadczalne wpływu odległości otworu od granicy warstw byłoby zbyt kosztowne ze względu na konieczność skomplikowanych prac konstrukcyjnych, związanych z budową odpowiednich modeli.

## **2.2. Podstawowa krzywa kalibracji gęstościowej sondy $\gamma - \gamma$**

Sonda spektrometryczna  $\gamma - \gamma$  służy m.in. do pomiaru gęstości ośrodka skalnego przewierconego otworem. Podstawowa krzywa kalibracji podaje zależność pomiędzy odpowiedzią detektorów sondy a gęstością jednorodnego ośrodka skalnego.

Gęstości ośrodka użyte do celu kalibracji sondy są gęstościami elektronowymi,  $\rho_e$ . Jest to specjalny rodzaj gęstości wprowadzonej na potrzeby sondy  $\gamma - \gamma$ , umożliwiającej jednoznaczne powiązanie gęstości ośrodka z efektywnością oddziaływań comptonowskich. Gęstość elektronową definiuje się jako gęstość ośrodka o hipotetycznym składzie atomowym, w którym stosunek liczby atomowej do masy atomowej  $Z/A = 0,5$ . Warunek mówiący o tym, że stosunek liczby atomowej do masy atomowej jest stały, umożliwia jednoznaczne

powiązanie gęstości elektronowej z gęstością objętościową. Przyjmuje się, że jest on równy 0,5, ponieważ jest to wielkość charakterystyczna dla większości pierwiastków skałotwórczych. Dla pierwiastków o wartościach  $Z$  nieprzekraczających znacząco wartości 20, stosunek  $Z/A$  jest bliski 0,5. Wyjątek stanowi wodór, dla którego ten stosunek wynosi 1. Dla pierwiastków o  $Z$  znacznie większym od 20 (np. ołów:  $Z = 82$ ), stosunek ten maleje do ok. 0,4. Zależność pomiędzy gęstością elektronową a gęstością objętościową wyraża się wzorem [Jarzyna et al., 1997]:

$$\rho_e = 2\rho_b \frac{\sum_i Z_i}{\sum_i A_i}, \quad \text{dla } Z/A \approx 0,5 \quad (2.1)$$

gdzie:

- $Z$  – liczba atomowa,
- $A$  – masa atomowa,
- $\rho_e$  – gęstość elektronowa,
- $\rho_b$  – gęstość objętościowa.

### 2.3. Idea wykresu „spine & ribs”

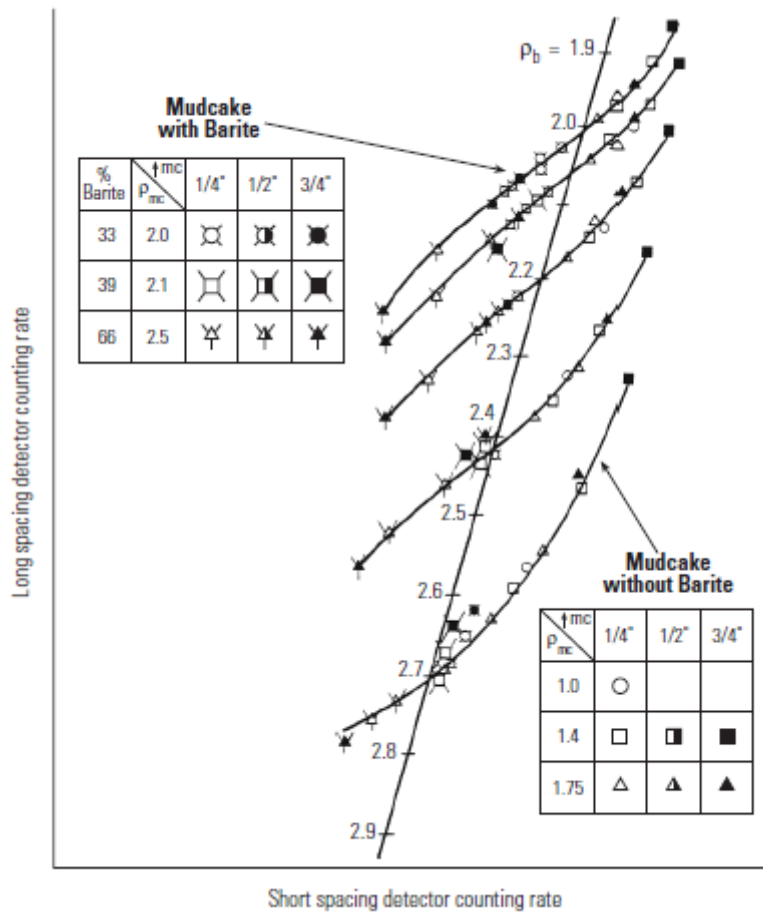
W celu uwzględnienia wpływu niejednorodności radialnych w pobliżu granicy otwór – skała, w okresie powstawania kablowej dwudetektorowej sondy  $\gamma - \gamma$ , zaproponowano nomogram zwany „spine & ribs” [Wahl et al., 1964] (Rys. 2.1). W owym czasie podstawowym problemem był tzw. „korek ilasty”, czyli osad płuczkowy tworzący się na ścianie otworu w miejscach, gdzie występowały skały przepuszczalne i dochodziło do filtracji płuczki do skały. Dla ówczesnych technologii płuczkowych osady te osiągały znaczące grubości, stąd grubość takiego osadu rozważanego dla przykładu z Rys 2.1 osiąga prawie 2 cm. W zależności od gęstości płuczki i porowatości skały, „korek ilasty” był lżejszy (płuczki bez obciążenia barytem) lub cięższy od skały (płuczki barytowe).

Idea tego wykresu polega na wykorzystaniu efektu różnych zasięgów przestrzennych detektora bliskiego i dalekiego sondy  $\gamma - \gamma$ . Detektor bliski odbiera sygnał z kilku centymetrowej warstewki cylindrycznej, co wynika zarówno z systemu kolimacji jak i niewielkiej odległości od źródła. Detektor daleki zbiera informację z nieco większej odległości, która sięga nieco powyżej 10 cm. W przypadku ośrodka jednorodnego zestawienie wskazań detektorów, jak na Rys. 2.1, będzie się układać wzdłuż prostej wyskalowanej w jednostkach gęstości (zwanej „spine” – kręgosłup). W przypadku niejednorodności, polegającej na pojawieniu się cylindrycznej warstewki przy ścianie otworu (strefy bliskiej) o gęstości różnej od gęstości skały poza tą warstewką, wskazania każdego z detektorów

zareagują inaczej. Detektor bliski, z racji większego w jego wskazaniach udziału strefy bliskiej, zareaguje na taką warstwę w stopniu większym niż detektor daleki. Dlatego właśnie pojawiają się na omawianym diagramie krzywe („ribs” – żebra) przecinające „spine” pod pewnym kątem, który dla większości sond kablowych bliski jest 30°. W miarę zwiększania się grubości tej bliskiej strefy punkty o współrzędnych wskazań detektora bliskiego i dalekiego będą się przesuwać wzdłuż żeber najpierw coraz dalej od „spine”, później jednak, gdy grubość tej strefy zacznie osiągać zakres przestrzenny detektora dalekiego, krzywe „ribs” przetną „spine” w punktach odpowiadających gęstościom strefy bliskiej. Dokładne przebiegi krzywych „ribs” zależą zarówno od rozstawu detektorów i systemu kolimacji, jak i od gęstości strefy bliskiej. Stosowanie wykresu „spine & ribs” polega na przesuwaniu punktu odpowiadającego wartościom wskazań sondy równolegle wzdłuż żeber w stronę kręgosłupa, co pozwala na odczytanie wartości gęstości skały dla strefy dalekiej. Różnica pomiędzy tak określoną gęstością, a jej wartością wyliczoną na podstawie wskazań detektora dalekiego, stanowi wielkość poprawki wskazującej na skalę wpływu strefy bliskiej.

Warto tu zaznaczyć, że rola wykresu „spine & ribs” we współczesnych pomiarach kablowych uległa rozszerzeniu. W przypadku, gdy stosowane są współczesne płuczki, których osady na ogół nie przekraczają pojedynczych milimetrów, strefa bliska obejmuje przestrzeń skalną, której gęstość może być zmieniana przez filtrat i wnikanie fazy stałej płuczki. Ta przestrzeń, zwana strefą kolmatacji, może być przedmiotem analizy w oparciu o technikę „spine & ribs”.

Wprowadzenie z kolei sondy  $\gamma - \gamma$ , jako jednego z narzędzi do pomiarów w trakcie wiercenia, gdzie sonda umieszczona jest w pierścieniu przewodu wiertniczego, doprowadziło do nowych zastosowań wykresów „spine & ribs”, jako sposobu eliminacji wpływu szczeliny pomiędzy sondą w przewodzie wiertniczym a skałą na wyznaczaną gęstość [Spross et al., 1993, 1995].



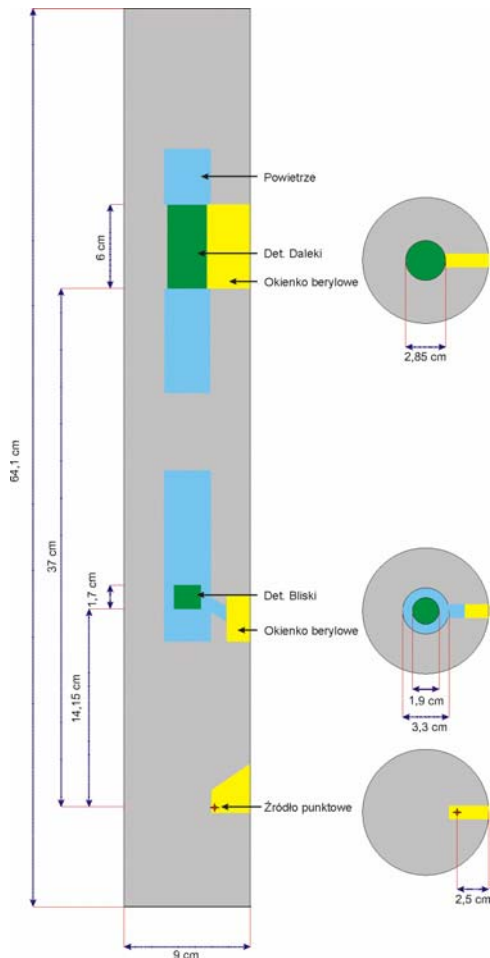
Rys. 2.1. Tradycyjny wykres „spine and ribs”, powstały wraz z konstrukcją pierwszych dwudetektorowych, kompensacyjnych sond gęstościowych [Wahl et al., 1964].

### 3. Numeryczne modelowanie odpowiedzi gęstościowej sondy $\gamma - \gamma$

W niniejszej pracy symulacje komputerowe metodą Monte Carlo zostały wykonane przy użyciu programu MCNP (*Monte Carlo N – Particle Transport Code*), a dokładnie jego wersji służącej do obliczeń równoległych [X-5 Monte Carlo Team, 2003]. Metoda obliczeniowa polega na symulowaniu trajektorii źródłowych kwantów gamma - oraz ich cząstek potomnych - w ośrodku skalnym przeciętym otworem. Kwanty gamma emituje umieszczone w sondzie źródło  $^{137}\text{Cs}$ . Zliczane są te kwanty gamma, które w wyniku kolejnych oddziaływań z atomami ośrodka docierają do detektorów umieszczonych w sondzie.

### 3.1. Model numeryczny sondy gęstościowej $\gamma - \gamma$

Do przeprowadzenia symulacji Monte Carlo wykorzystano model numeryczny sondy spektrometrycznej  $\gamma - \gamma$  wykonany przez Andrzeja Drabinę. Pierwszy etap pracy polegał na przeprowadzeniu obliczeń kalibracyjnych i porównaniu ich wyników z wynikami



Rys. 3.1. Model numeryczny sondy gęstościowej  $\gamma - \gamma$ . Legenda: kolor szary – wolfram, niebieski – powietrze, zielony – NaJ(Tl), żółty – beryl.

analogicznych obliczeń numerycznych przeprowadzonych przez A. Drabinę (Drabina i in., 2007). Wyniki obu powyższych, niezależnych serii obliczeń kalibracyjnych są w pełni zgodne.

Sonda ma kształt walca o średnicy 9 cm i długości 64,1 cm. Główne jej elementy to: źródło promieniowania gamma  $^{137}\text{Cs}$ , detektory kwantów gamma NaJ(Tl) – bliźki i daleki. Wszystkie elementy sondy umieszczone są w zamkniętej, cylindrycznej obudowie (jest to odpowiednik wysięgnika, z ang. *pad*) wykonanej z wolframu.

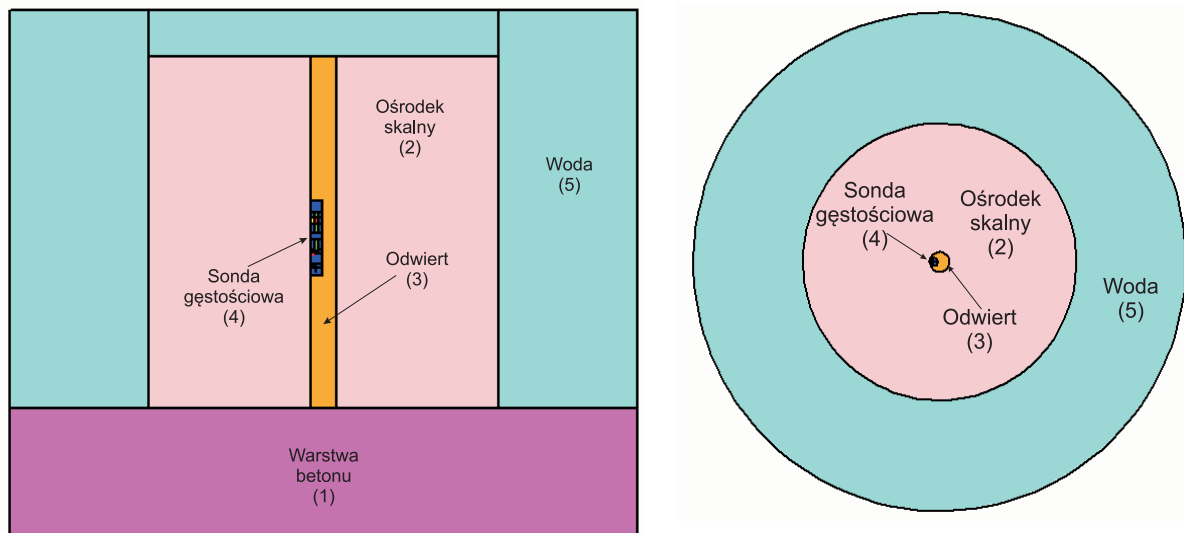
Źródło  $^{137}\text{Cs}$  jest monoenergetycznym źródłem punktowym, emitującym izotropowo fotony o energii 0,662 MeV. Okienko berylowe umożliwia emisję promieniowania źródłowego na zewnątrz w kierunku badanego ośrodka. Oba detektory wymodelowano jako kryształy NaJ(Tl) w kształcie walców. Detektor bliźki o średnicy 1,9 cm i wysokości 1,7 cm jest umieszczony w odległości 14,15 cm od źródła. Detektor daleki

o średnicy 2,85 cm i wysokości 6 cm znajduje się w odległości 37 cm od źródła. Oba detektory umieszczone są za otworami kolimacyjnymi przysłoniętymi okienkami berylowymi. Sonda umieszczona jest w odwiercie w taki sposób, że część sondy z okienkami berylowymi przylega do ścianki odwiertu. Takie umieszczenie sondy w otworze oraz usytuowanie detektorów za otworami kolimacyjnymi, przysłoniętymi okienkami berylowymi gwarantuje, że odpowiedź detektorów zależy przede wszystkim od parametrów ośrodka skalnego, a wpływ otworu oraz jego wypełnienia jest zaniedbywalnie mały. W obliczeniach

zakłada się, iż ta objętość sondy, w której znajdują się układy elektroniczne, nie wpływa na odpowiedź detektorów i dlatego została ona również zaniedbana. Schemat sondy przedstawia Rys. 3.1.

### 3.2. Model numeryczny ośrodka

W celu wykonania obliczeń numerycznych przyjęto geometrię pomiarową odzwierciedlającą stan rzeczywisty stanowiska kalibracyjnego w Zielonej Górze (Rys. 3.2). Ośrodek skalny usytuowany jest na betonowej stopie i otoczony warstwą wody. W kolejnych seriach obliczeniowych zmieniany jest tylko materiał elementu opisanego na rysunku jako „ośrodek skalny” oraz, ewentualnie, średnica i wypełnienie odwiertu. Sonda przylega do ściany odwiertu i na ogół jest umieszczana w środkowej części odwiertu.



Rys. 3.2. Model numeryczny jednorodnego, nieskończonego ośrodka skalnego z sondą  $\gamma$ - $\gamma$  umieszczoną w odwiercie.

Główne elementy geometrii obliczeniowej to:

1. warstwa betonu w kształcie walca o średnicy 540 cm i wysokości 150 cm, na której osadzone są pozostałe elementy,
2. ośrodek skalny w kształcie walca o średnicy i wysokości 300 cm,
3. warstwa wody o grubości 120 cm (boczna ściana ośrodka skalnego), oraz 50 cm ponad ośrodkiem skalnym,
4. odwiert - cylindryczny otwór w bloku skalnym o średnicy 21,6 cm i wysokości 300 cm, wypełniony wodą lub solanką,

5. sonda spektrometryczna gamma-gamma umieszczona ekscentrycznie w odwiercie. Dolna podstawa sondy sięga na głębokość 187,1 cm otworu.

Przyjęte założenia odnośnie geometrii układu, tj. wymiary ośrodka skalnego, rodzaj źródła, umiejscowienie źródła i detektorów, są wystarczające by symulowany transport promieniowania i jego detekcja mogły być traktowane jako wierne odzwierciedlenie rzeczywistych zjawisk zachodzących w ośrodku skalnym o „nieskończonych” rozmiarach.

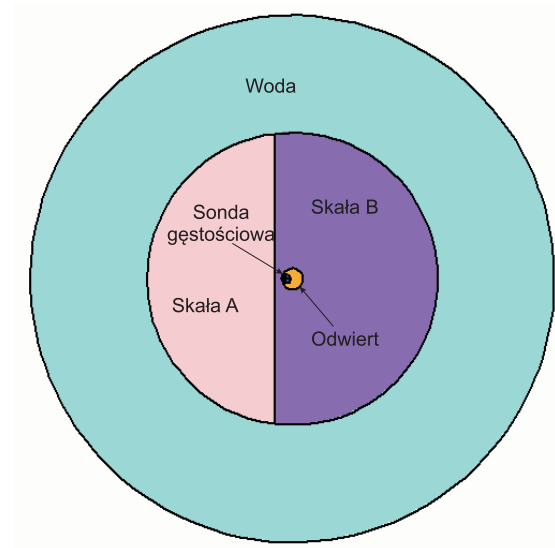
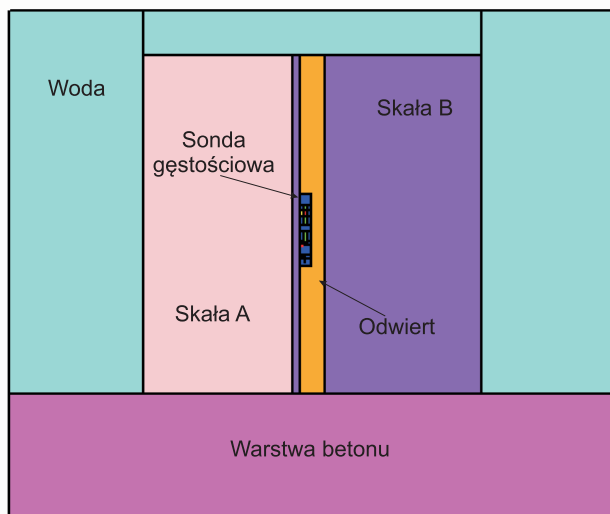
W pierwszej kolejności geometria ta została wykorzystana do wyznaczenia podstawowej krzywej kalibracji (w tych obliczeniach „ośrodek skalny” stanowił jednorodny blok magnezu lub aluminium). Następnie wyznaczono odpowiedzi sondy w dwóch jednorodnych ośrodkach skalnych oznaczanych jako skała A (niska porowatość, wysoka gęstość) i skała B (wysoka porowatość, niska gęstość).

Kolejne zadania polegały na wyznaczeniu odpowiedzi sondy w ośrodku skalnym składającym się z różnych kombinacji skał A i B.

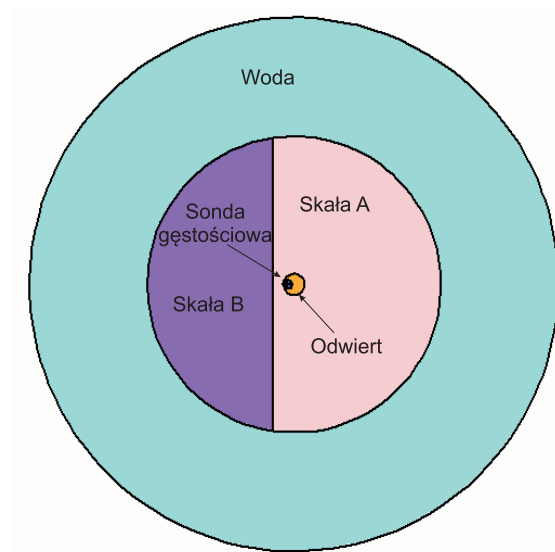
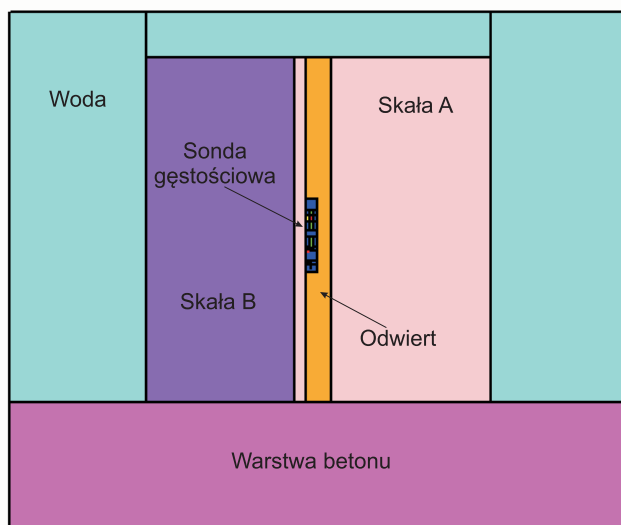
Dwie serie obliczeń dotyczyły przypadków, gdy sonda znajduje się w otworze równoległym do upadu dwóch przyległych warstw. Otwór znajduje się w jednej z warstw, ale granica warstw znajduje się w niewielkiej odległości od ściany odwiertu, i wpływa na sygnał sondy. Sygnał sondy jest badany w funkcji odległości sondy od granicy warstw. Schemat ideowy takiej geometrii przedstawiony jest w dalszej części pracy na Rys. 4.2 i 4.3, natomiast model numeryczny takiego układu, będący wariantem układu podstawowego (Rys. 3.2), przedstawiony jest na Rys. 3.3. Granica pomiędzy warstwami skalnymi jest płaszczyzną równoległą do osi odwiertu. Ze względu na duże rozmiary modelowanego układu, zastosowana geometria obliczeniowa jest kompatybilna z warunkami przedstawionymi na Rys. 4.2 i 4.3, odpowiadającymi sytuacji poziomego otworu przebiegającego w pobliżu granicy warstw równoległych do osi odwiertu. Zmiana odległości płaszczyzny podziału od osi odwiertu odzwierciedla zmianę grubości warstwy skalnej przylegającej bezpośrednio do ściany odwiertu od strony sondy. Obliczenia przeprowadzono dla dwóch wariantów: jeden, gdy w bezpośrednim sąsiedztwie sondy znajduje się skała o wysokiej porowatości i drugi – gdy w bezpośrednim sąsiedztwie sondy znajduje się skała o niskiej porowatości.



a)



b)

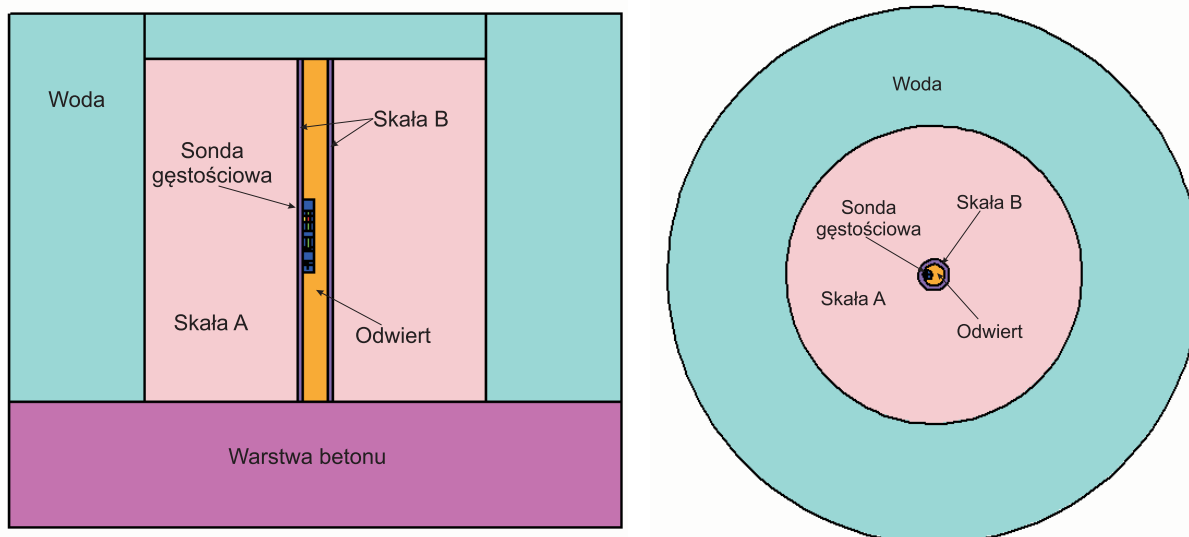


Rys. 3.3. Model numeryczny dwuwarstwowego ośrodka skalnego z sondą  $\gamma$ - $\gamma$  umieszczoną w odwiercie dla dwóch wariantów obliczeniowych, a) badanie wpływu skały A (niska porowatość) na odpowiedź sondy, gdy odwierc jest prowadzony w skale B (wysoka porowatość), b) sytuacja odwrotna: odwierc prowadzony w skale o niskiej porowatości.

Trzecia seria obliczeń dotyczyła układu pionowego odwierc przecinającego ośrodek skalny, w którym można wyróżnić cylindryczną strefę przyotworową o zmiennej grubości. Skałę i strefę przyotworową opisuje odpowiednio skała A i B, czyli taka sama formacja dolomitowa o znacząco różnych porowatościach. Geometria ta, w odróżnieniu od

poprzednich przypadków, charakteryzuje się symetrią osiową. Model numeryczny dla tej serii obliczeń przedstawiono na Rys. 3.4.

Celowość wybranych modeli obliczeniowych oraz analizę uzyskanych wyników przedstawiono w dalszej części pracy.



Rys. 3.4. Model numeryczny dwuwarstwowego ośrodka skalnego z sondą  $\gamma$ - $\gamma$  przylegającą do ściany odwiertu, w klasycznej geometrii cylindrycznej ze strefą przyotworową.

### 3.3. Dane wejściowe do obliczeń MCNP

Program MCNP wymaga, by wszystkie elementy rozpatrywanego układu fizycznego zostały zdefiniowane jako obszary geometryczne - objętościowe „komórki” - zawierające „materiał” o jednoznacznie określonym, jednorodnym składzie izotopowym. Dla pełnego opisu parametrów komórek obliczeniowych jest więc konieczna znajomość składu pierwiastkowego danego materiału, udziały wagowe poszczególnych pierwiastków w danym materiale, a także gęstości użytych materiałów. Dane te zostały przygotowane na podstawie założonych modeli geologicznych (patrz Rozdz. 4) i są przedstawione w Tabeli 3.1.

Metoda Monte Carlo polega na losowaniu zdarzeń, którym podlegają cząstki, w oparciu o przekroje czynne na ich oddziaływanie z materią. W programie MCNP istnieje, w ograniczonym zakresie, możliwość wyboru bibliotek przekrojów czynnych. W analizowanym przypadku przekroje czynne na oddziaływanie fotonów z atomami pierwiastków („Biblioteki MCNP” w Tabeli 3.1) pochodzą ze standardowej bazy danych jądrowych ENDF/B-VI.8. Biblioteka ta zawiera przekroje czynne na rozpraszanie koherentne,

niekoherentne, na zjawisko fotoelektryczne i zjawisko produkcji par dla energii fotonów od 1 keV do 100 GeV.

Tabela 3.1. Udziały wagowe pierwiastków wchodzących w skład modelowanych materiałów oraz nazwy bibliotek danych jądrowych z pakietu ENDF/B-VI.8 używanych dla realizacji obliczeń.

Material	Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]	Pierwiastek	Udział wagowy pierwiastka	Biblioteki MCNP
Kryształ NaJ(Tl)	3,67	Na	0,153297	11000.04p
		J	0,846203	53000.04p
		Tl	0,0005	81000.04p
Wolfram	19,25	W	1,0	74000.04p
Beryl	1,848	Be	1,0	4000.04p
Powietrze	0,001205	C	0,000124	6000.04p
		N	0,755267	7000.04p
		O	0,231781	8000.04p
		Ar	0,012827	18000.04p
Beton	2,30	H	0,0221	1000.04p
		C	0,002484	6000.04p
		O	0,57493	8000.04p
		Na	0,015208	11000.04p
		Mg	0,001266	12000.04p
		Al	0,019953	13000.04p
		Si	0,304627	14000.04p
		K	0,010045	19000.04p
		Ca	0,042951	20000.04p
Woda	1	H	0,666657	1000.04p
		O	0,333343	8000.04p
Solanka	1,297	H	0,03197	1000.04p
		O	0,25374	8000.04p
		Cl	0,4333081	17000.04p
		Na	0,28098	11000.04p
Magnez	1,777	Mg	1,0	12000.04p
Aluminium	2,713	Al	1,0	13000.04p
Skala A (dolomit o porowatości 3 %)	2,748	H	0,000959114	1000.04p
		C	0,114122	6000.04p
		O	0,507713	8000.04p
		Na	0,008429458	11000.04p
		Mg	0,1093984	12000.04p
		Al.	0,03334279	13000.04p
		Si	0,01262074	14000.04p
		Cl	0,01299924	17000.04p
		Ca	0,2004153	20000.04p
Skala B (dolomit o porowatości 37 %)	2,230	H	0,01182908	1000.04p
		C	0,07689692	6000.04p
		O	0,4109716	8000.04p
		Na	0,1039633	11000.04p
		Mg	0,0474499	12000.04p
		Al.	0,00740951	13000.04p
		Si	0,00280461	14000.04p
		Cl	0,160324	17000.04p
		Ca	0,178351	20000.04p

Wynikiem obliczeń numerycznych jest oczekiwana liczba reakcji (scyntytacji) w kryształach NaJ(Tl) każdego z detektorów, przypadająca na jeden kwant gamma wychodzący

ze źródła. Wartości te są odpowiednikami rzeczywistej odpowiedzi detektorów. Liczba reakcji zliczana była w 9 kanałach energetycznych:

1.	od	0,000 MeV	do	0,042 MeV
2.	od	0,042 MeV	do	0,088 MeV
3.	od	0,088 MeV	do	0,124 MeV
4.	od	0,124 MeV	do	0,254 MeV
5.	od	0,254 MeV	do	0,502 MeV
6.	od	0,502 MeV	do	0,616 MeV
7.	od	0,616 MeV	do	0,662 MeV
8.	od	0,662 MeV	do	0,710 MeV
9.	od	0,710 MeV	do	0,800 MeV

Przykładowy rozkład liczby reakcji zliczanych w kryształach NaJ(Tl) detektora bliskiego, w wymienionych przedziałach energetycznych jest zamieszczony w Tabeli 3.2 i przedstawiony na Rys. 3.5.

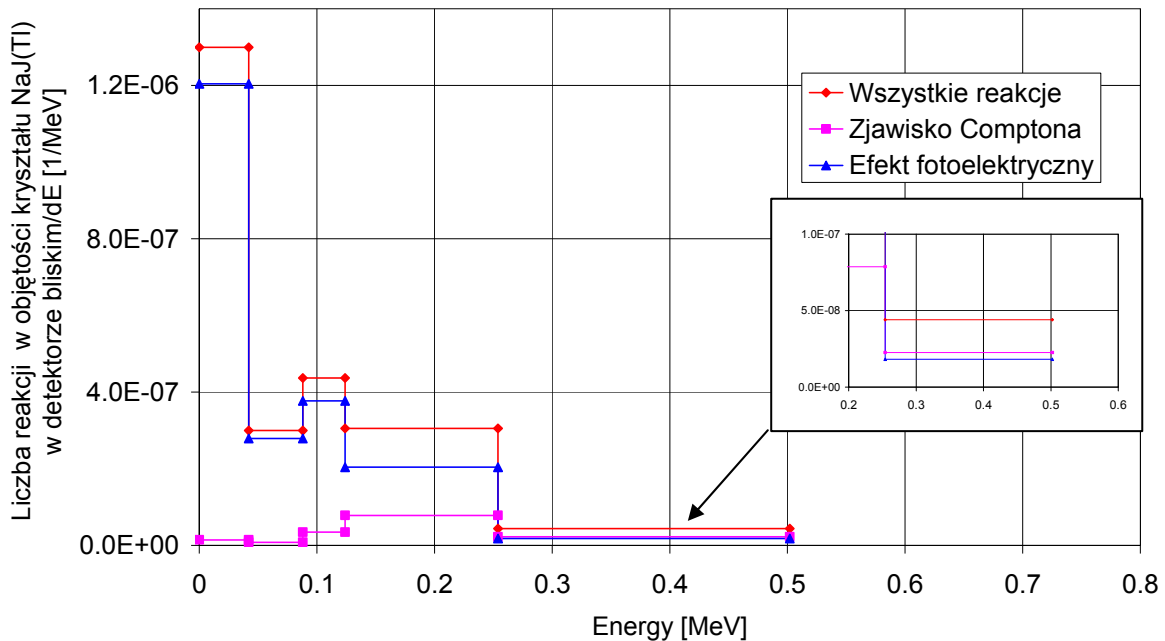
Tabela 3.2. Liczba reakcji rejestrowana w kryształach NaJ(Tl) detektora bliskiego przypadająca na jeden kwant gamma emitowany ze źródła dla modelu M1 (patrz Tabela 4.3) i odległości  $d = 7,5$  cm otworu do skały B.

Przedziały energetyczne [MeV]	Zjawisko fotoelektryczne		Efekt Comptona		Wszystkie reakcje	
	$I_{\text{fot}}$	Błąd względny	$I_{\text{Com}}$	Błąd względny	$I_{\text{tot}}$	Błąd względny
	$\left[ \frac{\text{liczba reakcji}}{\text{kwant } \gamma \text{ źródła}} \right]$	[%]	$\left[ \frac{\text{liczba reakcji}}{\text{kwant } \gamma \text{ źródła}} \right]$	[%]	$\left[ \frac{\text{liczba reakcji}}{\text{kwant } \gamma \text{ źródła}} \right]$	[%]
0,000 ÷ 0,042	5,06E-08	1,54	6,11E-10	1,60	5,46E-08	1,54
0,042 ÷ 0,088	1,28E-08	2,83	3,91E-10	3,04	1,38E-08	2,83
0,088 ÷ 0,124	1,36E-08	2,62	1,25E-09	2,66	1,57E-08	2,62
0,124 ÷ 0,254	2,65E-08	1,53	1,02E-08	1,46	3,97E-08	1,48
0,254 ÷ 0,502	4,52E-09	2,07	5,62E-09	2,00	1,09E-08	2,02
0,502 ÷ 0,616	0	0	0	0	0	0
0,616 ÷ 0,662	0	0	0	0	0	0
0,662 ÷ 0,710	0	0	0	0	0	0
0,710 ÷ 0,800	0	0	0	0	0	0

Na rysunku tym został przedstawiony udział efektu fotoelektrycznego oraz zjawiska Comptona w całkowitej liczbie reakcji, jakie zachodzą w kryształach NaJ(Tl) detektora bliskiego. Jest to wynik dla pierwszego z rozważanych przypadków (M-1) (Rys. 3.3), czyli sytuacji, kiedy otwór znajdował się w skale A (o mniejszej porowatości) a granica między skałami była płaszczyzną pionową równoległą do osi odwiertu i znajdowała się w odległości 7.5 cm od otworu. Jak należało oczekiwać, dla niskich energii - w tym konkretnym przypadku poniżej ok. 0.25 MeV - dominującym zjawiskiem jest efekt fotoelektryczny, natomiast dla energii wyższych zaczyna dominować zjawisko Comptona. Powyżej energii 0.502 MeV

praktycznie żadne reakcje nie są rejestrowane. Oczywiście, przy tak niskich energiach, poniżej 1 MeV, zjawisko krecacji par elektronowych nie może zachodzić z definicji.

Obliczenia prowadzone były tak długo, tj. symulowano historie tylu cząstek źródła, by względne błędy statystyczne estymowanych wielkości (liczby zliczeń w kanałach) nie przekraczały 10%.



Rys. 3.5. Liczba reakcji rejestrowana w kryształach NaJ(Tl) detektora bliskiego przypadająca na 1 kwant  $\gamma$  emitowany ze źródła dla modelu M-1 (patrz Tabela 4.3) i odległości  $d = 7,5$  cm otworu do skały B.

### 3.4. Parametry klastra komputerowego McRadiator

Obliczenia numeryczne zostały wykonane na klastrze komputerów „McRadiator” należącym do Zakładu Fizyki Transportu Promieniowania IFJ PAN. Każde z zadań MCNP liczone było z użyciem pełnej mocy obliczeniowej klastra, czasy obliczeń pojedynczego zadania mieściły się w granicach od 48 do 72 godz.

W skład klastra „McRadiator” wchodzi sześć niezależnych komputerów połączonych siecią wewnętrzną. Każda z tych 6-ciu maszyn wyposażona jest we wszystkie elementy hardware i software konieczne i wystarczające do samodzielnej pracy – własne procesory, pamięci, dyski, systemy operacyjne. Każdy z komputerów, elementów składowych klastra, nosi miano węzła (*ang. node*). Z punktu widzenia całości klastra „McRadiator” wyróżniają się dwa węzły o nazwach „node01” i „storage”.

Węzeł „node01” pełni rolę węzła dostępowego do całego systemu obliczeniowego, posiada publiczny adres IP w sieci Internet, co umożliwi użytkownikom dostęp do systemu z zewnątrz (z wykorzystaniem bezpiecznego protokołu SSH). Do pozostałych pięciu komputerów klastra nie ma bezpośredniego dostępu z sieci zewnętrznej, a tylko poprzez w/w węzeł „node01”.

Węzeł „storage” pełni natomiast rolę głównego węzła magazynowego. Wyposażony w dodatkową pamięć dyskową (pracującą w trybie RAID-5), udostępnia ją pozostałym pięciu komputerom klastra poprzez protokół NFS. Na komputerze „storage” zainstalowane jest także najważniejsze oprogramowanie systemowe i użytkowe, tworzące z tych sześciu odrębnych komputerów faktycznie jedną jednostkę obliczeniową – klastr „McRadiat”.

Pozostałe cztery węzły o nazwach „node02”, „node03”, „node04” i „node05” pełnią rolę zwykłych węzłów obliczeniowych. Oczywiście, tego typu rolę, zwykłych węzłów obliczeniowych, spełniają także węzły „node01” i „storage”.

Każdy z pięciu komputerów „node01” – „node05” wyposażony jest w dwa identyczne, czterordzeniowe procesory (równoważnik 8 „zwykłych” procesorów) Intel Xeon Quad Core E5345, taktowane zegarem 2,33 GHz. Natomiast węzeł „storage”, z uwagi na ciężące na nim dodatkowe zadania, wyposażony jest w dwa nieco mocniejsze procesory czterordzeniowe Intel Xeon Quad Core X5355, taktowane zegarem 2,66 GHz – co daje kolejne 8 procesorów. W sumie klastr można traktować jako połączenie 6 komputerów, każdy o 8 procesorach, lub – dzięki łączącej je szybkiej sieci wewnętrznej – jedną maszynę o 48 procesorach.

Każdy z sześciu komputerów, składowych klastra, posiada zainstalowany własny, ten sam, system operacyjny – Red Hat Enterprise Linux AS, release 4. Dzięki zainstalowanym bibliotekom MPICH2 możliwe jest prowadzenie obliczeń równoległych na wybranych node’ach i procesorach. MPICH2 jest najnowszą wersją biblioteki MPICH – ogólnodostępnej (*open source*) implementacji MPI – standardu przesyłania komunikatów pomiędzy procesami programów równoległych, działających na jednym lub więcej komputerach. Zainstalowane oprogramowanie daje możliwość wykonywania tej samej aplikacji, w naszym przypadku obliczeń MCNP, jednocześnie na kilku wybranych, a maksymalnie na wszystkich 48 procesorach całego klastra. Dzięki zainstalowanemu oprogramowaniu i z punktu widzenia prowadzonych obliczeń MCNP, klastr „McRadiat” może więc być traktowany jak pojedynczy komputer o dużej mocy obliczeniowej.

Oczywiście czasy wykonywanych obliczeń nie redukują się w prosty liniowy sposób wraz z dodawaniem kolejnych procesorów. Zależą nie tylko od zastosowanych rozwiązań hardware, ale także od możliwości „zrównoleglenia” danego programu – problemu.

Z dotychczasowych doświadczeń wynika, iż czasy obliczeń MCNP, z pełnym wykorzystaniem obecnej konfiguracji sprzętowo-programowej klastra, są ok. 12-15 razy krótsze, niż czas analogicznych obliczeń prowadzonych na pojedynczym komputerze z dwurdzeniowym procesorem typu Intel Dual Core, taktowanym zegarem o zbliżonej częstotliwości.

#### **4. Modele geologiczne i zadania obliczeniowe**

Podstawowym celem obliczeń było wykazanie możliwości użycia symulacyjnych metod Monte Carlo do badania odpowiedzi sondy gęstościowo-litologicznej typu gamma – gamma w warunkach otworów kierunkowych. Głównym problemem pojawiającym się w interpretacji pomiarów geofizycznych w otworach kierunkowych jest istnienie niejednorodności związanych z częstym przebiegiem takich otworów wzdłuż uławicenia osadów, a nie prostopadle, jak to ma najczęściej miejsce w otworach pionowych. Oznacza to utratę przez ośrodek otaczający otwór symetrii osiowo-cylindrycznej, która jest zakładana w przypadku otworów pionowych i która oznacza niezmienność parametrów skały wokół osi otworu. Dla takiej właśnie symetrii opracowane są podstawowe nomogramy poprawkowe i zgromadzone wieloletnie doświadczenia interpretacyjne. Jedynym realnym sposobem oceny skutków różnego typu takich asymetrii są obliczenia symulacyjne. W ramach wykonywanej pracy postawiono sobie za cel sprawdzić, w jaki sposób na wskazania sondy gamma – gamma wpływa odległość od ściany otworu płaskiej granicy warstw o znacząco różnej porowatości. Dla urealnienia sytuacji wybrano parametry skał zbliżone do wartości spotykanych w roponośnej formacji dolomitu głównego Polski północno-zachodniej, w której wykonywane są otwory kierunkowe. Cechą tej formacji jest dominacja w jej skałach dolomitu jako minerału z różną domieszką kalcytu. Obserwowana na profilach geofizyki wiertniczej tendencja wzrostu zawartości kalcytu w odcinkach o wyższej porowatości skłoniła do zróżnicowania składu szkieletu skalnego w zależności od porowatości. Zróżnicowanie takie może być przydatne w przyszłości, gdyby opracowany model użyto do badania indeksu absorpcji fotoelektrycznej  $P_e$ . Na obecnym etapie badań dotyczącym gęstości znaczenie tego zróżnicowania jest drugorzędne.

##### **4.1. Numeryczna kalibracja gęstościowej sondy $\gamma$ - $\gamma$**

Podstawową krzywą kalibracji sondy  $\gamma$ - $\gamma$  wykonuje się mierząc odpowiedzi detektorów sondy w dwóch jednorodnych ośrodkach o znacząco różnych gęstościach – w aluminium (glinie) i w

magnezie. Taką samą procedurę zastosowano przy wyznaczaniu krzywej kalibracji metodą modelowania komputerowego.

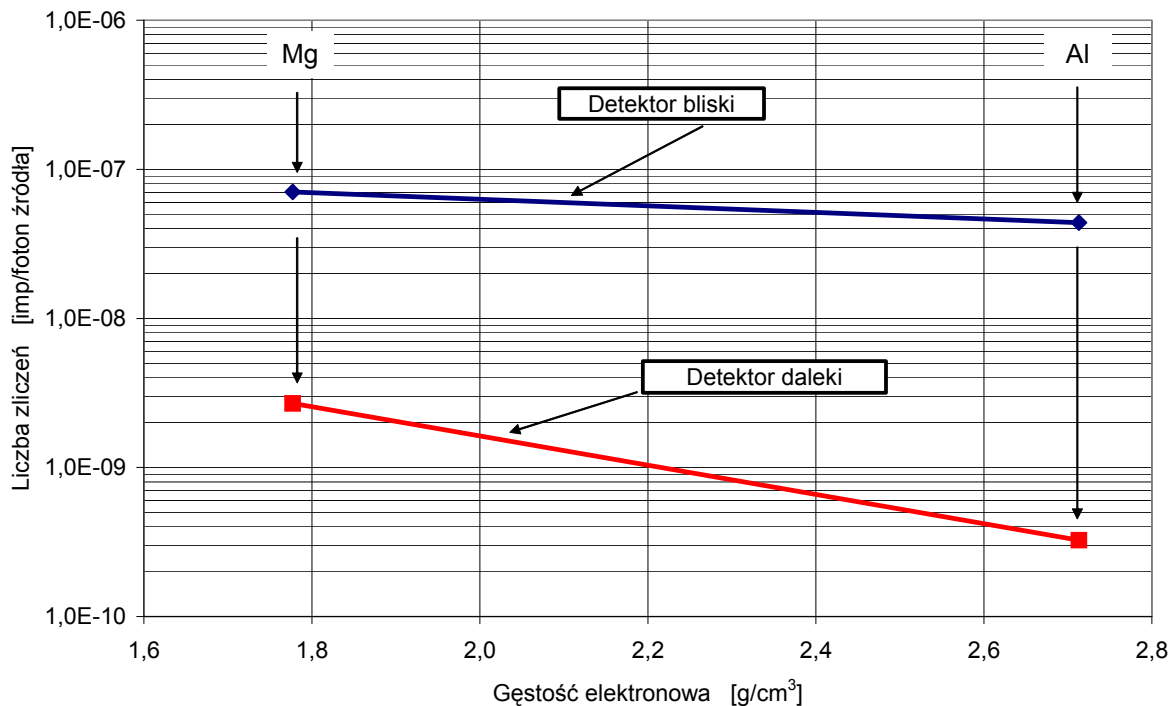
Symulację kalibracji sondy wykonano w oparciu o odpowiedzi sondy umieszczonej w cylindrycznym bloku wykonanym w całości z magnezu, Mg, a w drugim przypadku z glinu, Al, zgodnie z geometrią przedstawioną w Rozdz. 3.2 i na Rys. 3.2. Założono, że otwór wypełniony jest solanką NaCl o stężeniu 29,7% i gęstości 1,297 g/cm<sup>3</sup>. Przyjęto gęstości elektronowe dla Mg: 1,777 g/cm<sup>3</sup> i dla Al: 2,713 g/cm<sup>3</sup>. Sonda umieszczona jest w otworze w pozycji decentralizowanej, a odległość pomiędzy przyrządem a otworem jest pomijalna (dla potrzeb obliczeniowych przyjęto 0,001 cm). Wyniki obliczeń przedstawiono w Tabeli 4.1. W każdym przypadku liczba wysymulowanych historii cząstek wynosiła 6·10<sup>10</sup>.

Tabela 4.1. Wysymulowane odpowiedzi detektorów sondy gęstościowej  $\gamma$ - $\gamma$  w bloku magnezowym i aluminiowym. Wyniki symulacji (dla okna energetycznego 0,124 – 0,254 MeV) wyrażone w liczbie oddziaływań fotonów w objętości detektora przypadających na jeden foton wychodzący ze źródła.

Wzorzec	Detektor bliski $I_{bli}$ [ $\frac{\text{liczba reakcji}}{\text{kwant } \gamma \text{ źródła}}$ ]	Błąd względny [%]	Detektor daleki $I_{dal}$ [ $\frac{\text{liczba reakcji}}{\text{kwant } \gamma \text{ źródła}}$ ]	Błąd względny [%]
Magnez, Mg	$7,05 \cdot 10^{-8}$	0,74	$2,69 \cdot 10^{-9}$	1,23
Glin, Al	$4,3852 \cdot 10^{-8}$	0,92	$3,248435 \cdot 10^{-10}$	3,73

Na podstawie wyników obliczeń skonstruowano wykres kalibracji sondy. Nomogram wykonano w oparciu o odpowiednie zliczenia detektora bliskiego oraz dalekiego. Na osi pionowej wykresu kalibracyjnego (Rys. 4.1) przedstawiono logarytm naturalny liczby zliczeń (wg Tabeli 4.1), na osi poziomej zaznaczono gęstości elektronowe magnezu i glinu. Wybrany przedział energetyczny (0,124 ÷ 0,254 MeV) kwantów docierających do detektorów odpowiada zakresowi energii, dla której dominującym zjawiskiem jest efekt Comptona.





Rys. 4.1. Kalibracja numeryczna spektrometrycznej sondy gęstościowej  $\gamma-\gamma$ .

#### 4.2. Rodzaje zaprojektowanych modeli geologicznych

Obliczenia zostały wykonane dla ośrodka składającego się z układu dwóch skał węglanowych, oznaczonych jako skała A i skała B, różniących się zarówno porowatością jak i składem chemicznym. W Tabeli 4.2 podano skład chemiczny, gęstości szkieletowe, porowatości i gęstości objętościowe obydwu skał. Gęstości objętościowe odpowiadają przestrzeni porowej wypełnionej solanką o gęstości  $1,19 \text{ g/cm}^3$ . W Tabeli 4.3 przedstawiono dodatkowo procentowy (wagowo) skład pierwiastkowy szkieletu skalnego modeli z rozdziałem na poszczególne składniki mineralne.

Tabela 4.2. Skład chemiczny i własności petrofizyczne modeli geologicznych ośrodków skalnych.

	CaMg (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Gęstość szkie- letowa	H <sub>2</sub> O	NaCl	Poro- watość	Gęstość objęto- ściowa
	%wag	%wag	%wag	%wag	g/cm <sup>3</sup>	%wag	%wag	%obj	g/cm <sup>3</sup>
Skała A	83,00	5,00	2,70	6,30	2,75	0,86	2,14	0,27	2,75
Skała B	36,00	25,00	0,60	1,40	2,76	10,57	26,43	33,88	2,23

Modele skał przyjęte do symulacji numerycznych odpowiadają ośrodkowi skalnemu zbliżonemu do rzeczywistego, z jakim możemy mieć do czynienia w roponośnych formacjach dolomitu głównego Polski północno-zachodniej.

Tabela 4.3. Wagowy skład mineralogiczny i pierwiastkowy szkieletów skał stanowiących modele skalne do obliczeń symulacyjnych.

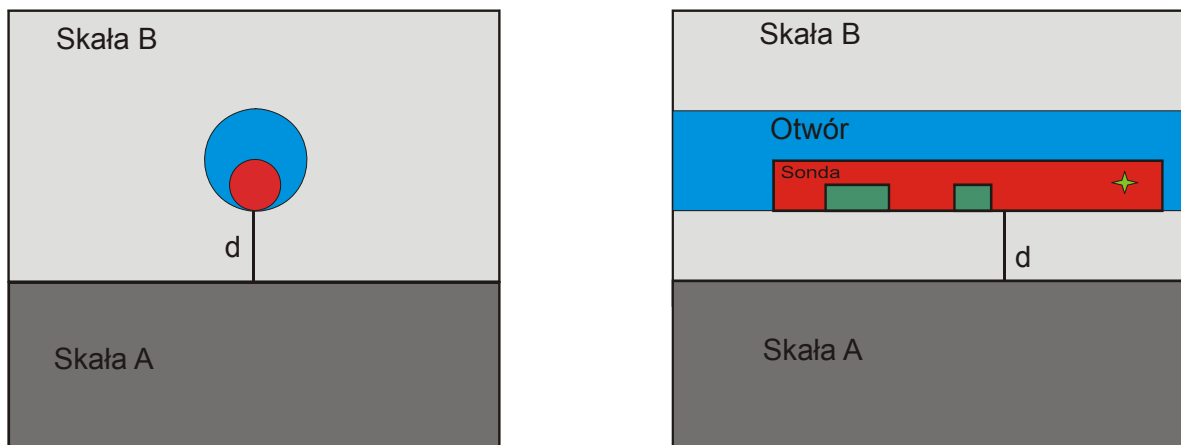
Minerał/Pierwiastek		Wagowa zawartość procentowa komponentu w skale		
		[%]		
		Skała A	Skała B	
Dolomit CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Wapń	18,039368592761	7,82430444987224	
	Magnez	10,9398386557976	4,74499026034594	
	Węgiel	10,8121884503755	4,68962390618696	
	Tlen	43,2086043010659	18,7410813835949	
	Całkowity udział w skale	83,0	36,0	
Wapień CaCO <sub>3</sub>	Wapń	2,00216012285324	10,0108006142662	
	Węgiel	0,600013588191861	3,00006794095931	
	Tlen	2,3978262889549	11,9891314447745	
	Całkowity udział w skale	5,0	25,0	
Minerały ilaste o uogólnionym składzie	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Glin	3,33427936700204	0,740950970444897
		Tlen	2,96572063299796	0,659049029555103
	Udział w skale		6,3	1,4
	SiO <sub>2</sub>	Krzem	1,26207428562869	0,280460952361931
		Tlen	1,43792571437131	0,319539047638069
	Udział w skale		2,7	0,6
	Całkowity udział w skale		9,0	2,0

Projektowane układy zakładają trzy podstawowe przypadki, z jakimi można się spotkać po odwierceniu otworu poziomego i pionowego:

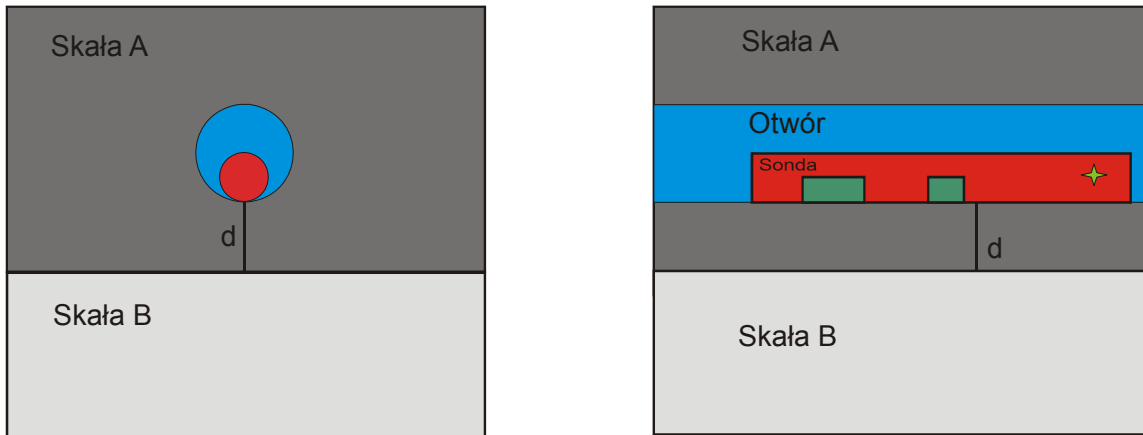
1. Skała jednorodna z przewierconym otworem - odpowiednikiem w rzeczywistych pomiarach jest sytuacja, gdy otwór wydrążony został w ośrodku o stałych własnościach petrofizycznych lub w dostatecznie dużej odległości od strefy zmiany własności, iż ich wpływ przestaje być rejestrowany przez sondę.
2. Układ charakterystyczny dla otworu poziomego: układ dwóch ośrodków skalnych oddzielonych od siebie poziomą granicą, wzdłuż której przebiega (w różnych odległościach od tej granicy) poziomy otwór wiertniczy. Przypadek ten odpowiada poziomo zalegającym skałom lub jednej skale, ale ze zmieniającymi się w jej obrębie właściwościami (sytuacja równoważna z charakterem skał spotykanych w formacji dolomitu głównego).
3. Układ charakterystyczny dla otworu pionowego: układ dwóch ośrodków skalnych o cylindrycznej symetrii kątowej wokół otworu. Przypadek ten został policzony dla

Dla przypadku 2 rozróżniono dwie sytuacje wzajemnego położenia warstw względem otworu. Układ M-1, przedstawiony na Rys. 4.2 zakłada, że otwór został wydrążony w skale o większej porowatości (skała B), a odległość (określona jako  $d$ ) pomiędzy otworem, a granicą zmiany litologii mieści się w przedziale od 0 cm do 20 cm (dla poszczególnych przypadków). Sonda w trakcie pomiaru znajduje się w dolnej części otworu.

Druga wymodelowana sytuacja geologiczna, M-2 różni się od M-1 położeniem otworu. W tym przypadku otwór wiertniczy znajduje się w skale A o porowatości 3%, a odległość otworu do skały B o porowatości 37%, zmienia się w zakresie od 0 do 10 cm (Rys. 4.3).

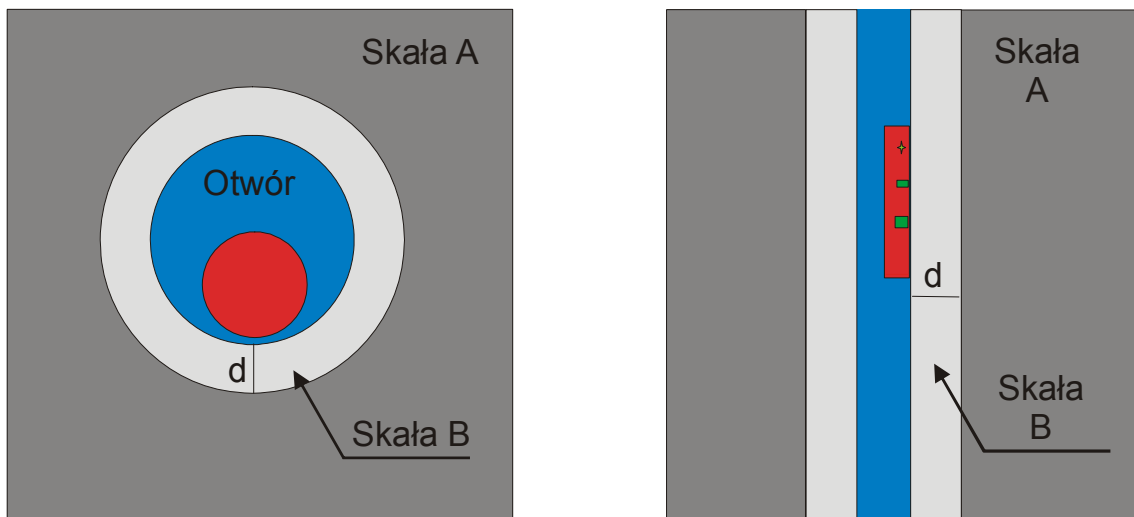


Rys. 4.2. Model obliczeniowy M-1. Otwór wydrążony w skale B o wysokiej porowatości ( $\Phi_B = 37\%$ ) w odległości  $d$  od skały A o niskiej porowatości ( $\Phi_A = 3\%$ ). Rysunek po lewej stronie przedstawia przekrój poprzeczny sytuacji.



Rys. 4.3. Model obliczeniowy M-1. Otwór wydrążony w skale A o niskiej porowatości ( $\Phi_A = 3\%$ ) w odległości  $d$  od skały B o wysokiej porowatości ( $\Phi_B = 37\%$ ). Rysunek po lewej stronie przedstawia przekrój poprzeczny sytuacji.

Trzeci rozważany przypadek, układ M-3, zakłada zmianę geometrii kontaktu między skałą A i B. W odróżnieniu od wcześniejszych przypadków, granica zalegająca poziomo zastąpiona została układem, w którym skała B otacza otwór i ma kształt cylindra. Poza strefą skały B, w odległości od 1,5 cm do 15 cm, znajduje się skała A.



Rys. 4.4. Model obliczeniowy M-3 odpowiadający geometrii cylindrycznej otworu i otaczających warstw. Otwór wydrążony w skale B o geometrii cylindrycznej i wysokiej porowatości ( $\Phi_B = 37\%$ ) w odległości  $d$  od skały A o niskiej porowatości ( $\Phi_A = 3\%$ ). Rysunek po lewej stronie przedstawia przekrój poprzeczny sytuacji.

### 4.3. Przypadki symulowane programem MCNP

Szczegółowe założenia symulowanych przypadków zostały przedstawione w Tabeli 4.4. Obliczenia przeprowadzono dla 23 odrębnych sytuacji różniących się geometrią układu. Parametry modeli dobrano w taki sposób, aby w jak najlepszym stopniu poznać charakter zmian odpowiedzi sondy gęstościowej w ośrodku, a tym samym jak najdokładniej zbadać wpływ niejednorodności ośrodka.

Tabela 4.4. Specyfikacja przypadków symulowanych programem MCNP.

Lp.	Model	Odległość $d$ otworu od granicy warstw [cm]
1	Skala jednorodna (skała A), z przewierconym otworem.	-
2	Skala jednorodna (skała B), z przewierconym otworem.	-
3	M-1: skała B z przewierconym otworem. Pozioma granica pomiędzy skałą B a skałą A.	0
4		1,0
5		1,5
6		2,5
7		3,5
8		5,0
9		7,5
10		10,0
11		15,0
12		20,0
13	M-2: skała A z przewierconym otworem. Pozioma granica pomiędzy skałą A a skałą B.	0
14		2,5
15		5,0
16		7,5
17		10,0
18	M-3: skała B z przewierconym otworem. Cylindryczna granica pomiędzy skałą B a skałą A.	1,5
19		2,5
20		3,5
21		5,0
22		7,5
23		10,0
24	15,0	

Liczba zadanych, pojedynczych historii (nps) mieści się w przedziale  $4 \cdot 10^{10} \div 8 \cdot 10^{10}$ . Różnice w liczbach historii nie wpłynęły na jakość danych – zostały spełnione wszystkie testy statystyczne. Obliczenia przypadków należących do modelu M-1 wskazały, że odległość  $d = 15$  cm może być traktowana jako układ nieskończony.

## 5. Geofizyczna interpretacja wyników symulacji

Analiza wpływu niejednorodności w przestrzeni obejmowanej zasięgami detektorów bliskiego i dalekiego sondy  $\gamma - \gamma$  narzuca użycie do tego celu, wcześniej omówionej techniki „spine & ribs”. Technika opracowana została wprawdzie dla przypadku symetrii osiowo-cylindrycznej, ale jej zastosowanie do analizowanego przypadku oddalającej się od ściany otworu, równoległej do jego osi granicy warstw, jest w pełni uzasadnione.

Tabela 5.1. Wyszumowane odpowiedzi detektorów sondy gęstościowej  $\gamma - \gamma$  w poszczególnych wariantach obliczeniowych. Wyniki symulacji (dla okna energetycznego 0,124 – 0,254 MeV) wyrażone w liczbie oddziaływań fotonów w objętości detektora przypadających na jeden foton wychodzący ze źródła.

Model	$d$ [cm]	Detektor bliski			Detektor daleki			Liczba historii [nps]
		$I_{bli}$ [liczba reakcji kwant $\gamma$ źródła]	Błąd wzgl. [%]	$\ln(I_{bli})$	$I_{dal}$ [liczba reakcji kwant $\gamma$ źródła]	Błąd wzgl. [%]	$\ln(I_{dal})$	
<b>Skala A</b>	-	4,02E-08	1,19	-17,02924	2,30E-10	6,22	-22,19153	$6 \cdot 10^{10}$
<b>Skala B</b>	-	5,35E-08	1,04	-16,74403	8,40E-10	3,29	-20,89817	$6 \cdot 10^{10}$
<b>M-1</b>	0,0	4,14E-08	0,86	-16,99918	2,28E-10	3,99	-22,20008	$6 \cdot 10^{10}$
	1,0	4,35E-08	0,84	-16,95040	2,49E-10	3,81	-22,11331	$6 \cdot 10^{10}$
	1,5	4,46E-08	1,01	-16,92458	2,90E-10	4,32	-21,96212	$6 \cdot 10^{10}$
	2,5	4,82E-08	0,97	-16,84774	3,14E-10	4,17	-21,88296	$4 \cdot 10^{10}$
	3,5	5,16E-08	0,67	-16,77942	3,85E-10	2,75	-21,67761	$8 \cdot 10^{10}$
	5,0	5,37E-08	0,73	-16,74076	4,76E-10	2,70	-21,46613	$6,6 \cdot 10^{10}$
	7,5	5,30E-08	0,94	-16,75223	5,73E-10	3,17	-21,27936	$4 \cdot 10^{10}$
	10,0	5,33E-08	0,95	-16,74767	6,66E-10	2,93	-21,12918	$4 \cdot 10^{10}$
	15,0	5,35E-08	0,78	-16,74279	7,80E-10	2,23	-20,97185	$6 \cdot 10^{10}$
20,0	5,35E-08	0,78	-16,74421	8,32E-10	2,19	-20,90692	$6 \cdot 10^{10}$	
<b>M-2</b>	0,0	5,41E-08	0,77	-16,73327	8,10E-10	2,21	-20,93423	$6 \cdot 10^{10}$
	2,5	4,53E-08	0,83	-16,91093	6,14E-10	2,53	-21,21023	$6 \cdot 10^{10}$
	5,0	3,97E-08	0,87	-17,03477	3,24E-10	2,90	-21,55118	$6 \cdot 10^{10}$
	7,5	3,94E-08	1,06	-17,04123	2,83E-10	4,06	-21,85048	$4 \cdot 10^{10}$
	10,0	3,96E-08	0,87	-17,04456	2,74E-10	3,72	-22,01828	$6 \cdot 10^{10}$
<b>M-3</b>	1,5	4,49E-08	0,82	-16,91963	2,64E-10	3,59	-22,05538	$6 \cdot 10^{10}$
	2,5	4,83E-08	0,79	-16,84575	2,88E-10	3,52	-21,96768	$6 \cdot 10^{10}$
	3,5	5,18E-08	0,71	-16,77589	3,57E-10	3,00	-21,75233	$6 \cdot 10^{10}$
	5,0	5,38E-08	0,76	-16,73801	4,33E-10	2,93	-21,55926	$6 \cdot 10^{10}$
	7,5	5,37E-08	0,77	-16,73931	5,78E-10	2,57	-21,27096	$6 \cdot 10^{10}$
	10,0	5,39E-08	0,67	-16,73538	6,76E-10	2,08	-21,11509	$8 \cdot 10^{10}$
	15,0	5,37E-08	0,78	-16,74067	7,89E-10	2,22	-20,95962	$6 \cdot 10^{10}$

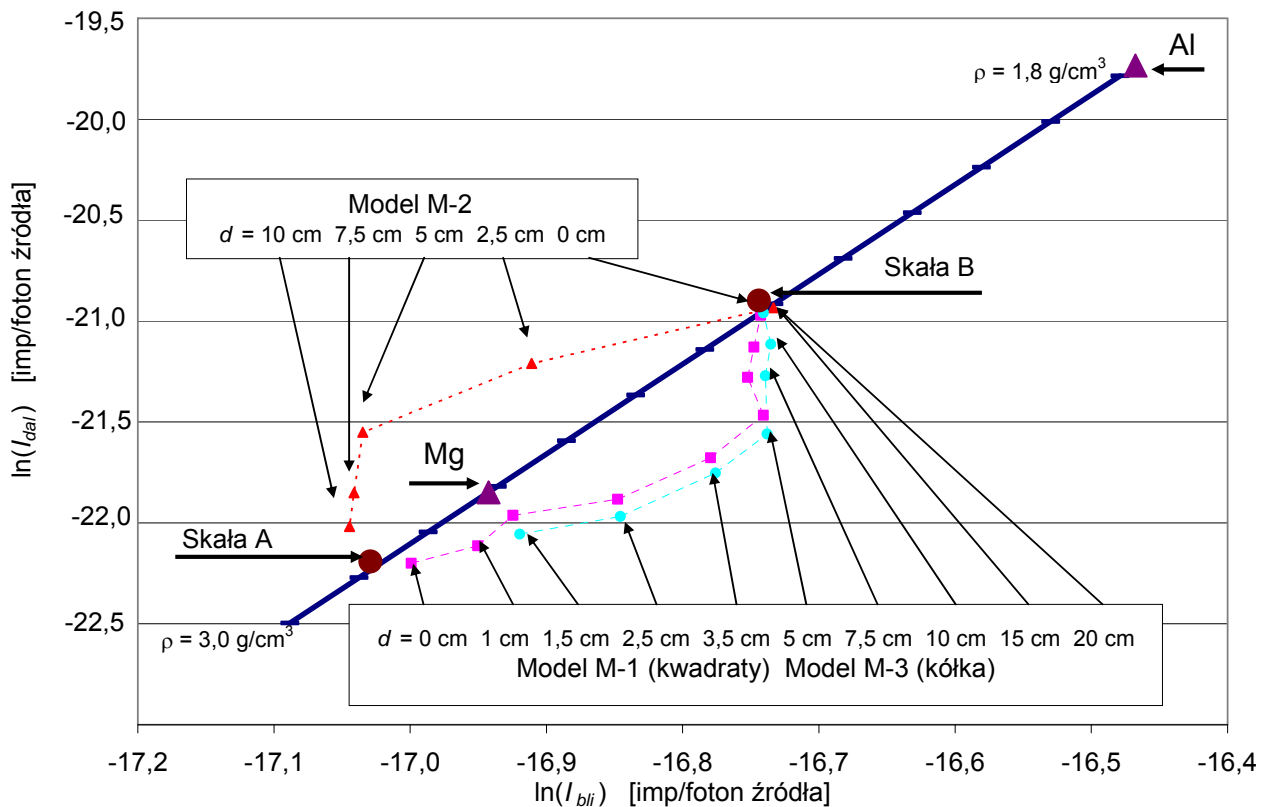
Wysymulowane zliczenia kwantów docierających do detektorów przedstawiono na wykresie logarytmicznym wykonanym wg reguł opisanych w rozdziale 2.3. Gdy naniesione punkty lokalizują się w pewnej odległości od „spine”, oznacza to, że w ośrodku występują dwie strefy i detektor bliski zbiera informację głównie ze strefy bliższej, a detektor daleki z obydwu stref jednocześnie.

Wszystkie obliczone punkty zostały naniesione na wykres przedstawiony na Rys. 5.1, na którym można identyfikować model, dla którego były liczone (M-1, M-2, M-3) jak i odległość  $d$  ścianki otworu od granicy warstw. Zakresy błędów obliczeniowych MCNP pokrywają się z wielkością punktów na wykresie. Punkty obliczeniowe naniesiono na tle prostej „spine” poprowadzonej przez punkty kalibracyjne dla Mg i Al. Na Rys. 5.2, który jest powtórzeniem wykresu z Rys. 5.1, naniesiono dodatkowo pod kątem  $30^\circ$  do „spine” pozostałe elementy siatki, czyli prostoliniowe „ribs”, odpowiadające różnym gęstościom strefy bliskiej. Siatka ta pozwala na łatwiejsze porównanie położenia symulowanych punktów z dotychczas znanymi wykresami „spine & ribs”. Na Rys. 5.2, oprócz punktów obliczeniowych naniesiono arbitralnie dobrane linie ciągłe przybliżone wielomianami z zaznaczonymi strzałkami kierunkami wzrostu odległości granicy warstw od ścianki otworu. Linie te pokazują, pomimo odstawania niektórych punktów, ogólny trend symulowanego procesu. Pewnym ograniczeniem w doborze tych linii było założone przybliżanie ich funkcyjnymi zależnościami wielomianowymi. Krzywe te należy traktować z ostrożnością wobec obecnych rozbieżności z punktami obliczeniowymi. Potwierdzają one jednak znane dotychczas z badań doświadczalnych kształty krzywych „ribs”. Pełne potwierdzenie sugerowanych trendów wymagałoby obliczeń dla większej liczby kombinacji układów gęstości warstw.

Analizując położenie punktów obliczonych dla poszczególnych modeli, można stwierdzić, że zasięg modelowanej sondy wynosi ok. 10 cm. Jeżeli odległość pomiędzy otworem a granicą skał przekracza tę wielkość, to punkt pomiarowy lokuje się w tym samym miejscu co dla skały, w której wydrążony został otwór – sonda rejestruje zatem ośrodek jednorodny, czyli z punktu widzenia sondy nieskończony.

Punkty znajdujące się po prawej stronie kręgosłupa odnoszą się do modeli M-1 i M-3. Położenie punktów w tym obszarze oznacza, że sonda w miarę wzrostu odległości  $d$  w coraz większym stopniu rejestruje kwanty, których historie związane są z przechodzeniem przez ośrodek bliższy, w tym przypadku o mniejszej gęstości (większej porowatości). Gdy odległość  $d$  przekracza 10 cm, punkty pomiarowe ( $d = 15$  cm, M-1,  $d = 20$  cm, M-1), lokują się w położeniu punktu „Skała B” (lżejsza). Porównanie modeli M-1 i M-3 pokazuje, że

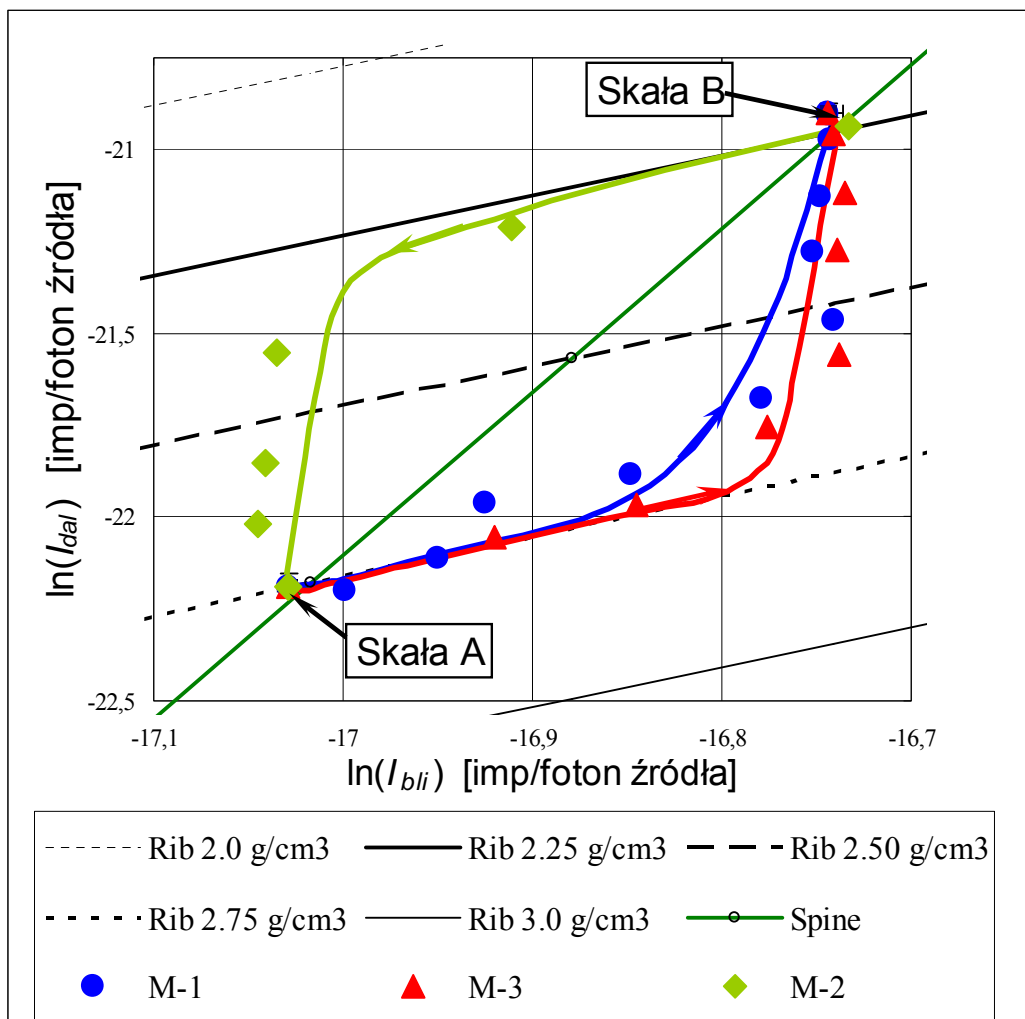
zmiana geometrii powierzchni granicznej warstw z płaskiej (M-1) na cylindryczną (M-3) nieco zmienia tempo reakcji detektorów bliskiego i dalekiego na kontrast gęstości ośrodków, co skutkuje położeniem punktów modelu M-1 nieco bliżej kręgosłupa w porównaniu do punktów modelu M-3.



Rys. 5.1. Zestawienie położenia punktów odpowiedzi dwudetektorowej sondy  $\gamma - \gamma$  w stosunku do prostej „spine” dla różnych przypadków położenia sondy w stosunku do układu warstw i odległości ( $d$ ) granicy warstw od ścianki otworu.

Punkty po lewej stronie kręgosłupa, odnoszą się do modelu M-2. Wykazują one podobne zachowanie do punktów z obliczeń dla modeli M-1 i M-3 z tą różnicą, że ponieważ tym razem ośrodkiem bliższym jest skała o większej gęstości, wzrost jej udziału w sygnale sondy powoduje spadek zliczeń. W miarę wzrostu odległości  $d$  punkty przesuwały się wzdłuż „rib” od punktu na „spine” odpowiadającego skale B (lżejsza) do punktu skały A (cięższa).





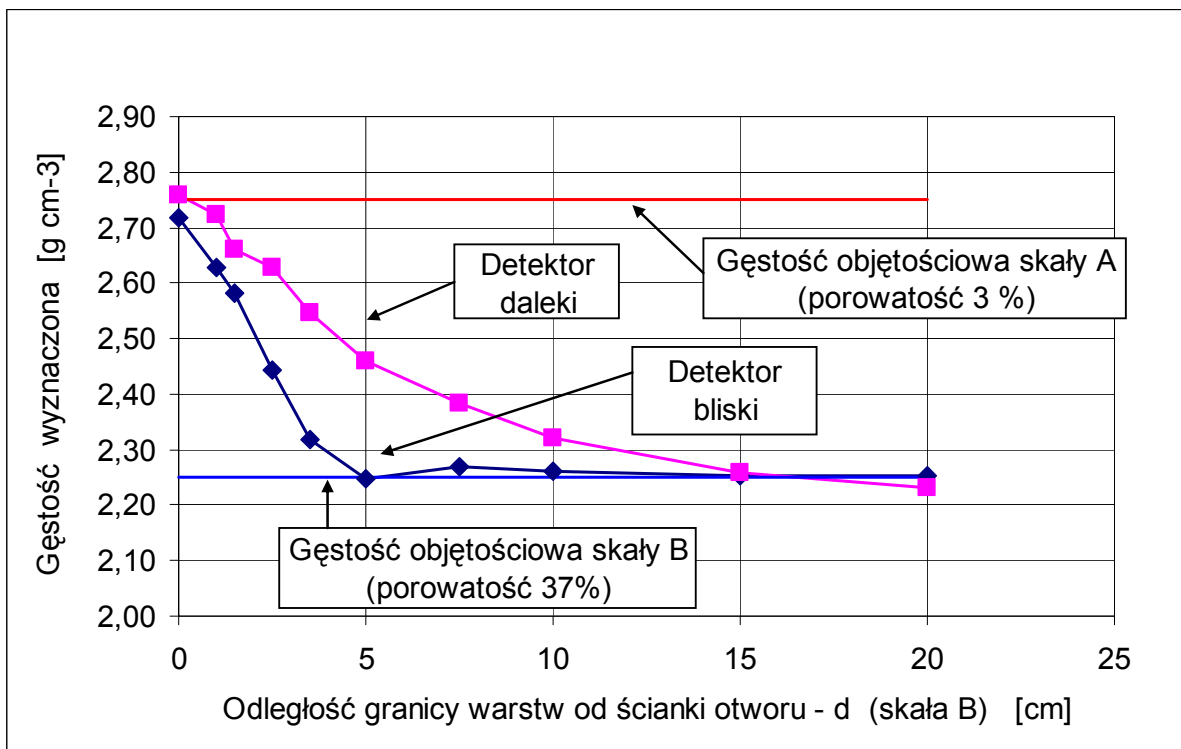
Rys. 5.2. Przybliżone wielomianami krzywe położenia punktów odpowiedzi dwudetektorowej sondy gamma – gamma na zmienną odległość powierzchni granicy warstw od ścianki otworu. Modele układu warstw: M-1 – krzywa niebieska, M-2 – krzywa zielona, M-3 – krzywa czerwona.

Uzupełnieniem powyższego opisu zachowania się wskazań sondy w modelach M-1, M-2 i M-3 są zależności pokazane na Rys. 5.3, 5.4 i 5.5, gdzie zestawiono wskazania detektorów przeliczone na gęstość (Tab. 5.2) w funkcji odległości granicy warstw ( $d$ ) od ścianki otworu. Rysunki te stanowią dekompozycję zestawień z Rys. 5.1 i 5.2, pozwalającą łatwiej zaobserwować zmiany zasięgu przestrzennego wskazań poszczególnych detektorów, który dla detektora bliskiego nie przekracza 5 cm a dla dalekiego nieco przekracza 10 cm.

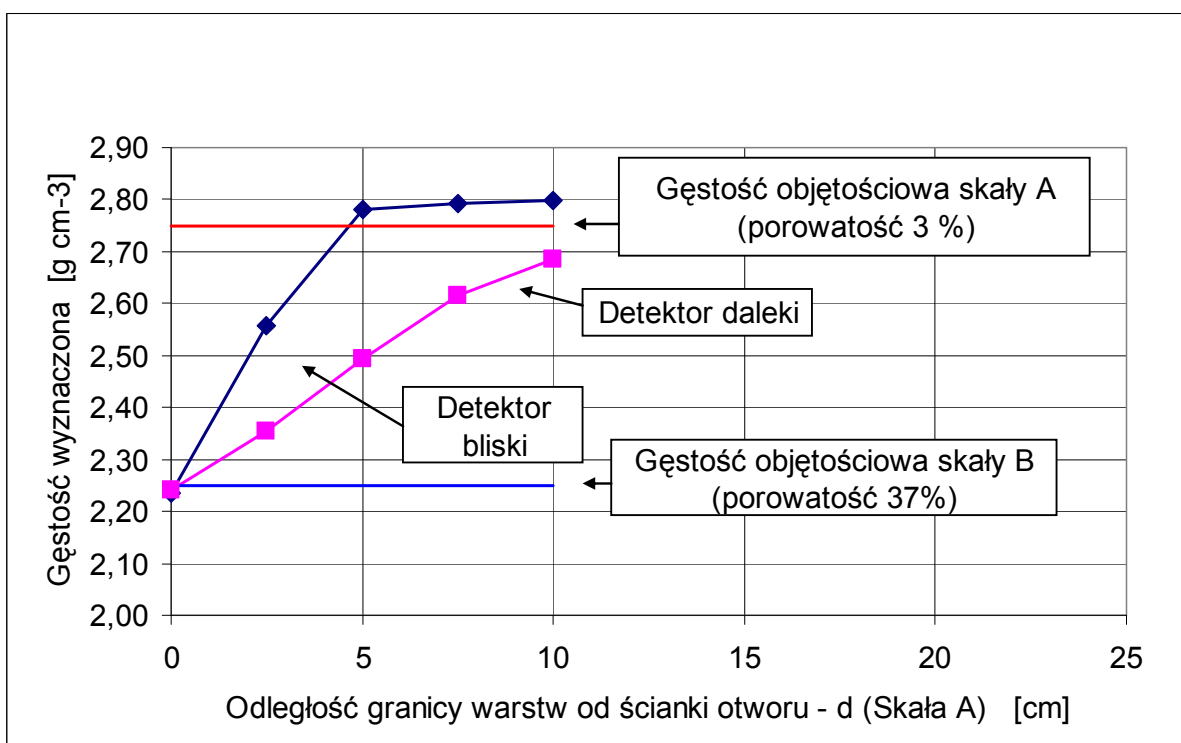
Omawiając otrzymane wyniki należy podkreślić, że wykonana symulacja dotyczy wyidealizowanego przykładu, gdy sonda dokładnie przylega do ściany otworu, a zatem w realnych warunkach, dodatkowym zaburzeniem może być obecność w bliskiej strefie zasięgu sondy szczeliny pomiędzy sondą a skałą, wypełnionej płuczką, której gęstość jest zbliżona do gęstości wody.

Tabela 5.2. Wskazania obydwu detektorów sondy przeliczone na gęstość wg krzywych kalibracyjnych detektorów (Rys. 4.1) dla trzech modeli skalnych i różnych odległości  $d$  pomiędzy ścianką otworu i granicą warstw o różnych gęstościach.

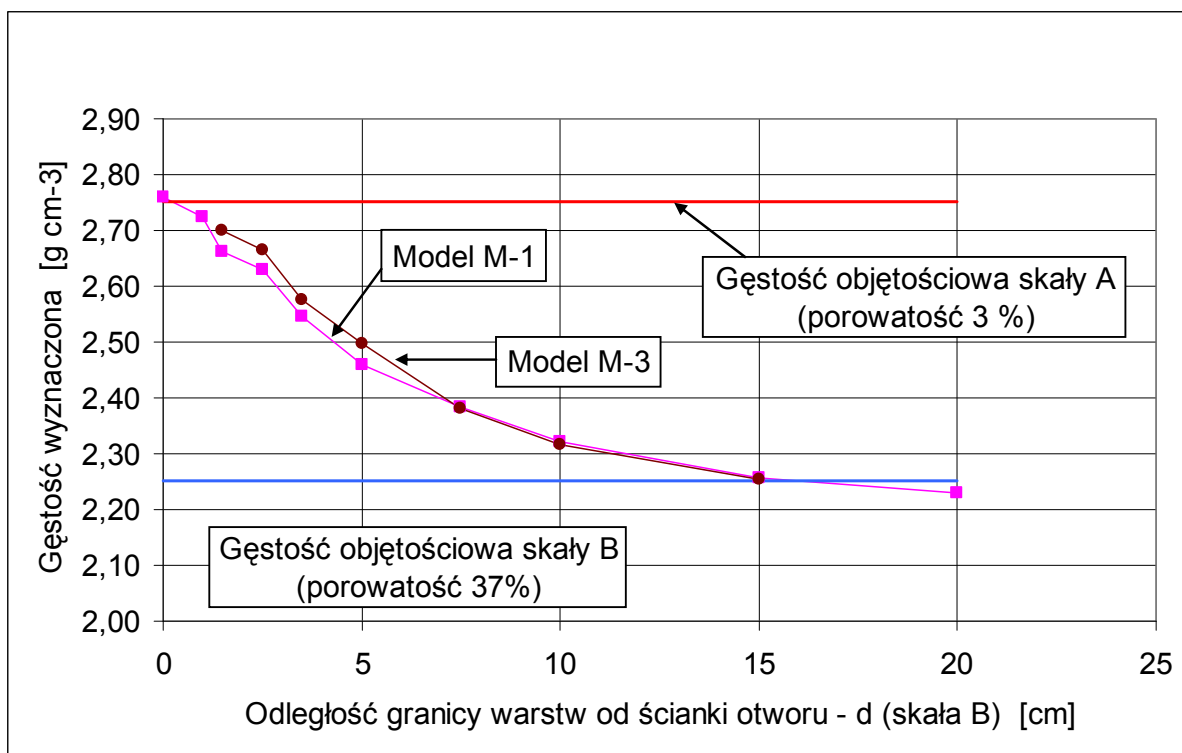
Lp.	$d$ [cm]	Gęstość obliczona z krzywej kalibracji [g/cm <sup>3</sup> ]		Gęstość oczekiwana z wykresu S&R [g/cm <sup>3</sup> ]	
		det. bliski	det. daleki		
M-1	1	0	2,717	2,759	2,75
	2	1,0	2,628	2,723	2,75
	3	1,5	2,582	2,662	2,75
	4	2,5	2,442	2,629	2,75
	5	3,5	2,318	2,546	2,75
	6	5,0	2,248	2,459	2,75
	7	7,5	2,269	2,383	2,75
	8	10,0	2,260	2,322	2,75
	9	15,0	2,252	2,258	2,75
	10	20,0	2,254	2,231	2,75
M-2	11	0	2,234	2,242	2,25
	12	2,5	2,557	2,355	2,25
	13	5,0	2,782	2,494	2,25
	14	7,5	2,793	2,616	2,25
	15	10,0	2,799	2,685	2,25
M-3	16	1,5	2,573	2,700	2,75
	17	2,5	2,438	2,664	2,75
	18	3,5	2,312	2,576	2,75
	19	5,0	2,243	2,497	2,75
	20	7,5	2,245	2,380	2,75
	21	10,0	2,238	2,316	2,75
	22	15,0	2,248	2,253	2,75



Rys. 5.3. Gęstość obliczona na podstawie odpowiedzi detektorów bliskiego i dalekiego. Model M-1.



Rys. 5.4. Gęstość obliczona na podstawie odpowiedzi detektorów bliskiego i dalekiego. Model M-2.



Rys. 5.5. Gęstość obliczona na podstawie odpowiedzi detektora dalekiego. Porównanie modelu M-1 i M-3.

## 6. Podsumowanie

Wykonane obliczenia pozwalają na sformułowanie następujących wniosków.

1. Realizując opisany cykl obliczeń wykazano możliwość wykonywania symulacyjnych obliczeń dla sondy gamma – gamma w warunkach dowolnie skomplikowanej geometrii ośrodka o praktycznie dowolnych własnościach fizycznych i chemicznych. Obliczenia te mogą być wykonywane nawet na komputerach typu PC, jednak wykonanie znacznej liczby symulacji potrzebnych do zrealizowania skomplikowanego eksperymentu wymaga dostępu do szybszych komputerów o wydajności co najmniej takiej, jaką posiada klaster McRadiat. W omawianych przykładach czas obliczeń pojedynczego punktu trwał 2 – 3 doby. Otwiera to możliwość wyjaśniania nietypowych odpowiedzi sond w warunkach otworów kierunkowych, dla których można spodziewać się wielu niejasności wynikających ze zmiennych warunków ułożenia sondy w otworze jak i relacji otworu w stosunku do przewierczanych warstw. Prace w takim zakresie mogą być realizowane zarówno na bieżąco, na życzenie interpretatorów pomiarów, lub wyprzedzająco, przez przewidywanie sytuacji nietypowych i skatalogowanie przewidzianych nietypowych odpowiedzi sondy.

2. Wykonany cykl obliczeń daje przykład badania jednej z takich potencjalnie możliwych sytuacji. Jest to przypadek znacząco wyidealizowany, pozwala jednak stwierdzić jak sonda gamma – gamma reaguje na niejednorodność wynikającą z obecności płaskiej granicy warstw przebiegającej równoległe do osi otworu. Wykonane obliczenia pokazują, że stosując tradycyjną formę wykresu „spine & ribs” jesteśmy w stanie oceniać, czy otwór wiertniczy znajduje się w pobliżu takiej granicy, przy założeniu, że na wskazania sondy nie wpływają innego typu niejednorodności. Sygnałem zbliżania się otworu do granicy warstw jest oddalanie się punktów o współrzędnych wskazań detektora bliskiego i dalekiego i zestawionych w formie nomogramu „spine & ribs”, od prostej „spine”.
3. Rozważając bardziej złożony przypadek można do tego typu obliczeń wprowadzić szczelinę pomiędzy sondą a skałą. Jeśli skała będzie jednorodna będzie to możliwość oceny wpływu tej szczeliny i redukcji jej wpływu. Jest to częsty przypadek przy pomiarach na przewodzie wiertniczym, gdzie obecność szczeliny, ze względów technicznych jest nieunikniona. Przy braku jednorodności skały, czyli podobnie jak dla rozważanego wcześniej przypadku granicy warstw, zagadnienie może być jednoznacznie rozwiązane tylko wówczas, jeśli wielkość szczeliny zostanie zmierzona (np. za pomocą niezależnego czujnika akustycznego) i wprowadzona do obliczeń jako dodatkowy parametr.

## Literatura

- Bedford J., Cuddy S., and White J. (1997): The Empirical Investigation of Density Anisotropy in Horizontal Gas Wells. SPWLA 38th Annual Logging Symposium, June 15-18, 1997, Paper I.
- Czubek J.A. (1966): Physical possibilities of gamma – gamma logging, In: Radioisotope Instruments in Industry and Geophysics, IAEA, Vienna, 1966, vol. II, 249 – 275.
- Czubek J.A. (1992): Scaling neutron fields in well logging, Nucl. Geophys. 6 (4), 1992, 444 – 486.
- Drabina A., Zorski T., Woźnicka U. (2007): Symulacja metodą Monte-Carlo odpowiedzi spektralnej sondy gęstościowej gamma-gamma w otworze poziomym z uwzględnieniem strefy filtracji. Praca wykonana w ramach działalności naukowej sieci tematycznej koordynowanej przez Instytut Nafty i Gazu: „Nowe aplikacje w zakresie udostępniania i eksploatacji złóż węglowodorów otworami kierunkowymi i poziomymi” w 2007 roku. Zadanie badawcze realizowane w IFJ PAN: „Metodyka pomiarowo-interpretacyjna profilowań geofizycznych w otworach kierunkowych i poziomych (cz. II)”.
- Holenka J., Best D., Evans M., Kurkoski P., Sloan W. (1995): Azimuthal Porosity while Drilling, SPWLA 36<sup>th</sup> Annual Logging Symposium, June 26-29, 1995, Pap. BB.
- Jarzyna J., Bała M., Zorski T. (1997): Metody geofizyki otworowej, pomiary i interpretacja, Kraków 1997.
- Moake G.L., Beals R.A., Schultz W.E. (1996): Reduction of Standoff Effects on LWD Density and Neutron Measurements, SPWLA 37<sup>th</sup> Annual Logging Symposium, June 16-19, 1996, Pap. V.

- Passey Q. R., Yin H., Rendeiro C. M., and Fitz D. E. (2005): Overview of High-angle and Horizontal Well Formation Evaluation: Issues, Learnings, and Future Directions. SPWLA 46th Annual Logging Symposium, June 26-29, 2005, Paper A.
- Radtke R.J., Adolph R.A., Climent H., Ortenzi L., Wijeyesekera N. (2003): Improved Formation Evaluation through Image-derived Density, SPWLA 44<sup>th</sup> Annual Logging Symposium, June 22-25, 2003. Pap. P.
- Singer J. M. (1992): An Example of Log Interpretation in Horizontal Wells. *The Log Analyst*, March-April 1992, p. 85-95.
- Spross R., Burnett T., Freeman J., Jones D., Paske W., Zannoni S. (1993): Formation Density Measurement while Drilling, SPWLA 34<sup>th</sup> Annual Logging Symposium, June 13-16, 1993, Pap. PP.
- Spross R., Burnett T., Golla C., Huiszoon C. (1995): Accurate MWD Density Measurements with Very Large Standoffs, SPWLA 36<sup>th</sup> Annual Logging Symposium, June 26-29, 1995, Pap. UU.
- Wahl J.S., Tittman J., Johnstone C.W., Alger R.P. (1964): The Dual Spacing Formation Density Log, *JPT*, December 1964, p.1411 – 1416.
- Woźnicka U. (red.) (2008): Nowe aplikacje w zakresie udostępniania i eksploatacji złóż węglowodorów otworami kierunkowymi i poziomymi. *Prace Instytutu Nafty i Gazu Nr 152*, ISSN 0209-0724.
- X-5 Monte Carlo Team, (2003): MCNP – A General Monte Carlo N – Particle Transport Code, Version 5, LA-UR-03-1987 Los Alamos National Laboratory.
- Zorski T., Massalski T. (1997): Empirical and semiempirical approach to the comprehensive calibration of nuclear logging tools, *Extended Abstracts Book, Vol. 1.*, 59<sup>th</sup> EAGE Conference and Technical Exhibition, Geneva, Switzerland, 26-30 May 1997, Poster P-172.
- Zorski T., Woźnicka U., Drozdowicz K. (2008): Metody jądrowe w profilowaniach otworów kierunkowych i poziomych. W: Nowe aplikacje w zakresie udostępniania i eksploatacji złóż węglowodorów otworami kierunkowymi i poziomymi, *Prace Instytutu Nafty i Gazu Nr 152*, red. U. Woźnicka; ISSN 0209-0724.