



PAŃSTWOWA  
AGENCJA  
ATOMISTYKI

# Załącznik

do zaleceń technicznych Prezesa

Państwowej Agencji Atomistyki

dotyczących

oceny sejsmiczności podłoża  
dla lokalizacji obiektów jądrowych  
metodyka oceny prawdopodobieństwa  
wystąpienia wstrząsów sejsmicznych

oraz

metodyka oceny hazardu sejsmicznego





**Załącznik do**

# **zaleceń technicznych**

**Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki  
dotyczących**

**oceny sejsmiczności podłoża  
dla lokalizacji obiektów jądrowych**

**Metodyka oceny prawdopodobieństwa  
wystąpienia wstrząsów sejsmicznych**

**oraz**

**metodyka oceny hazardu sejsmicznego**

Warszawa, 2013

Państwowa Agencja Atomistyki  
ul. Krucza 36  
00-522 Warszawa

# SPIS TREŚCI

<b>I. METODYKA OCENY PRAWDOPODOBIENSTWA WYSTĄPIENIA WSTRZĄSÓW SEJSMICZNYCH .....</b>	<b>5</b>
I.1. PODEJŚCIE PROBABILISTYCZNE I DETERMINISTYCZNE .....	6
I.1.1. Parametry wejściowe .....	7
I.1.2. Ocena występowania wstrząsów naturalnych - podejście deterministyczne.....	8
I.1.2.1. Parametry wynikowe .....	8
I.1.2.2. Interpretacja wyników oceny sejsmiczności obszaru dla celów projektowych.....	9
I.1.2.3. Ocena wiarygodności i jakości danych.....	9
I.1.3. Oceny prawdopodobieństwa wystąpienia wstrząsów naturalnych - podejście probabilistyczne .....	9
I.1.3.1. Parametry wynikowe .....	10
I.1.3.2. Interpretacja wyników oceny sejsmiczności obszaru dla celów projektowych.....	10
I.1.3.3. Ocena wiarygodności i jakości danych.....	10
I.1.4. Ocena występowania wstrząsów indukowanych .....	11
I.1.4.1. Parametry wejściowe i wynikowe .....	11
I.1.4.2. Interpretacja wyników oceny sejsmiczności obszaru dla celów projektowych.....	11
<b>II. METODYKA OCENY HAZARDU SEJSMICZNEGO .....</b>	<b>12</b>
II.1. OCENA HAZARDU SEJSMICZNEGO DLA WSTRZĄSÓW NATURALNYCH - PODEJŚCIE DETERMINISTYCZNE	13
II.1.1. Parametry wejściowe i wynikowe.....	13
II.2. OCENA HAZARDU SEJSMICZNEGO DLA WSTRZĄSÓW NATURALNYCH - PODEJŚCIE PROBABILISTYCZNE	14
II.2.1. Parametry wejściowe i wynikowe.....	14
II.3. OCENA HAZARDU SEJSMICZNEGO DLA WSTRZĄSÓW INDUKOWANYCH.....	15
II.3.1. Metodologia przeprowadzania oceny .....	15
II.3.2. Parametry wejściowe i wynikowe.....	17
II.4. USTALANIE MARGINESÓW BŁĘDU .....	19
II.4.1. Dla danych studyjnych .....	19
II.4.2. Dla danych z badań terenowych.....	19
II.5. ZARZĄDZANIE BRAKIEM LUB NIEKOMPLETNOŚCIĄ DOSTĘPNYCH DANYCH .....	20
II.5.1. Ekstrapolacja danych .....	20
II.5.2. Ustalanie granicy błędu i zapasu bezpieczeństwa dla ekstrapolacji .....	20
II.6. INTERPRETACJA WYNIKÓW OCENY HAZARDU SEJSMICZNEGO DLA CELÓW PROJEKTOWYCH .....	20
<b>III. UWAGI OGÓLNE DOTYCZĄCE DOKUMENTACJI ANALIZY ZAGROŻENIA SEJSMICZNEGO</b>	<b>21</b>
<b>IV. OPIS METODYKI OCENY HAZARDU SEJSMICZNEGO.....</b>	<b>22</b>
IV.1. WSTĘP .....	22
IV.2. ETAPY ANALIZY HAZARDU SEJSMICZNEGO.....	23
IV.2.1. Wyznaczenie stref sejsmogenicznych.....	23
IV.2.2. Charakterystyki sejsmiczności wydzielonych stref sejsmogenicznych .....	25
IV.2.2.1. Podejście deterministyczne .....	25
IV.2.2.2. Podejście probabilistyczne .....	26
IV.2.3. Wyznaczanie relacji tłumienia drgań gruntu dla badanego rejonu .....	28
IV.2.4. Estymacja krzywych hazardu sejsmicznego .....	31
IV.2.4.1. Podejście deterministyczne .....	31
IV.2.4.2. Podejście probabilistyczne .....	32
IV.3. OCENA NIEPEWNOŚCI ESTYMACJI HAZARDU SEJSMICZNEGO .....	35
IV.4. OCENA HAZARDU SEJSMICZNEGO W WARUNKACH WYSTĘPOWANIA SEJSMICZNOŚCI INDUKOWANEJ ..	36
IV.4.1. Proces sejsmiczny zmienny w czasie. Sejsmiczność indukowana działalnością górniczą .....	37
IV.4.1.1. Wydzielanie stref sejsmogenicznych aktywnych obecnie oraz w przeszłości.....	38

IV.4.1.2. Wyznaczenie probabilistycznych charakterystyk sejsmiczności stref aktywnych obecnie i w przeszłości .....	38
IV.4.1.3. Prognoza położenia i czasu aktywności stref aktywnych w przyszłości.....	39
IV.4.1.4. Prognoza probabilistycznych charakterystyk sejsmiczności stref przyszłych dla okresu objętego analizą.....	39
IV.4.1.5. Wyznaczenie Predykcyjnych Równań Drgań Podłoża.....	40
IV.4.1.6. Prognoza probabilistycznych charakterystyk parametrów drgań .....	40
<i>IV.4.2. Ocena niepewności analizy .....</i>	<i>40</i>
<i>IV.4.3. Interpretacja wyników oceny hazardu sejsmicznego dla celów projektowych .....</i>	<i>40</i>
<b>V. SŁOWNIK WYBRANYCH POJĘĆ.....</b>	<b>41</b>
<b>VI. LITERATURA.....</b>	<b>43</b>

# I. METODYKA OCENY PRAWDOPODOBIEŃSTWA WYSTĄPIENIA WSTRZĄSÓW SEJSMICZNYCH

Projekt i wykonanie obiektu jądrowego muszą uwzględniać zagrożenie sejsmiczne wywołane dwoma poziomami trzęsień ziemi, do których na etapie projektowania przypisywane są określone wymogi wytrzymałościowe obiektu, które zapobiegają określonym skutkom technologicznym i radiologicznym jakie mogą wystąpić dla wstrząsu charakterystycznego dla każdego z tych poziomów. W przepisach poszczególnych państw istnieje wiele interpretacji wymagań IAEA w zależności od warunków krajowych i wymogów bezpieczeństwa. W rozporządzeniu (Rady Ministrów z dnia 10 sierpnia 2012 r. w sprawie szczegółowego zakresu przeprowadzania oceny terenu przeznaczonego pod lokalizację obiektu jądrowego, przypadków wykluczających możliwość uznania terenu za spełniający wymogi lokalizacji obiektu jądrowego oraz w sprawie wymagań dotyczących raportu lokalizacyjnego dla obiektu jądrowego, Dz. U. z 2012 r. poz. 1025???) przyjęto, że w raporcie lokalizacyjnym określone zostaną maksymalne wstrząsy, o których mowa w §2 pkt 1, a na ich podstawie zostaną określone i zastosowane kryteria przesiewowe §5 pkt 3, 4 i 7. W niniejszych zaleceniach przyjęto nomenklaturę polską *ETZ* i *MOTZ*, przy czym należy przez nie rozumieć odpowiednio: **E**ksploatacyjne **T**rząsienie **Z**iemii, *ETZ*, jako tzw. **O**perating **B**asis **E**arthquake, *OBE* oraz **M**aksymalne **O**bliczeniowe **T**rząsienie **Z**iemii, *MOTZ*, jako tzw. **S**afe **S**hutdown **E**arthquake, *SSE*. Zazwyczaj *ETZ* odpowiada połowie *MOTZ*. Magnituda *MOTZ* jest ustalona w oparciu o oszacowanie potencjalnego maksymalnego trzęsienia ziemi na podstawie regionalnej i lokalnej geologii, sejsmologii i własności warstw przypowierzchniowych. Zakłada się, że *MOTZ* generuje maksymalne drgania gruntu, na które obiekty jądrowe oraz ich systemy i elementy wyposażenia są odporne w stopniu pozwalającym na zachowanie możliwości ich dalszej bezpiecznej eksploatacji. Według wykładni rozporządzenia, *MOTZ* będzie maksymalnym dopuszczalnym wstrząsem / trzęsieniem ziemi, wywołującym w miejscu posadowienia obiektu jądrowego drgania o magnitudzie poniżej 8 EMS-98, jaki może wystąpić z prawdopodobieństwem  $10^{-4}$  i pozwoli zachować możliwość dalszej eksploatacji obiektu jądrowego.

W przypadku reaktorów jądrowych, po wystąpieniu takiego trzęsienia ziemi muszą być spełnione trzy warunki:

1. nieprzekroczenie granicznego ciśnienia medium chłodzącego reaktora;
2. możliwość bezpiecznego wyłączenia reaktora;
3. zdolność do zapobiegania lub łagodzenia skutków zdarzeń, które mogą być przyczyną podwyższonego promieniowania na obszarach położonych poza lokalizacją obiektu jądrowego względem przyjętej dyrektywy dla tego obszaru.

W sejsmologii inżynierskiej wielkość *MOTZ* jest zdefiniowana za pomocą szczytowego przyspieszenia drgań gruntu, *PGA*, (**P**ea**K** **G**rou**N**d **A**cceleration) i odpowiadającym mu spektrów odpowiedzi. Dla istniejących obiektów jądrowych minimalne projektowe wartości *PGA* zaczynają się od wartości 0.1g dla obszarów o słabej aktywności sejsmicznej. Zgodnie z zasadami bezpieczeństwa, minimalna szczytowa wartość poziomego przyspieszenia drgań gruntu (*PHA* – ang.: **P**ea**K** **H**oriz**O**ntal **G**rou**N**d **A**cceleration) dla wszystkich obiektów jądrowych powinna wynosić co najmniej 0.1g. Dla obiektu jądrowego określa się dwa poziomy przyspieszenia drgań gruntu, nazywane typowo SL-1 i SL-2 (seismic levels 1 & 2). Eksploatacyjnemu Trzęsieniu Ziemi odpowiada poziom SL-1, natomiast Maksymalnemu Obliczeniowemu Trzęsieniu Ziemi poziom SL-2. Poziom SL-2 odpowiada najbardziej restrykcyjnym wymogom bezpieczeństwa, odnosi się do drgań gruntu z bardzo małym

prawdopodobieństwem przewyższenia w okresie funkcjonowania obiektu jądrowego i odpowiada maksymalnej wartości drgań gruntu zakładanych dla potrzeb jego projektowania. Poziom SL-1 odnosi się do wymogów bezpieczeństwa odpowiadającym bardziej prawdopodobnemu trzęsieniu ziemi. Minimalna wartość *PHA* ustalona na 0.1g odpowiada poziomowi SL-2 zagrożenia sejsmicznością. W oparciu o te dane, przy projektowaniu ustalana jest klasyfikacja sejsmiczna systemów i elementów wyposażenia obiektu jądrowego dla celów projektowych.

## I.1. Podejście probabilistyczne i deterministyczne

Zgodnie z kryteriami projektowymi obiektów jądrowych do określenia *MOTZ* oraz *ETZ* wykorzystuje się obecnie podejście probabilistyczne lub podejście deterministyczne. Obie metody, **Probabilistyczna Analiza Hazardu Sejsmicznego (PAHS)** oraz **Deterministyczna Analiza Hazardu Sejsmicznego (DAHS)**, wykorzystują tę samą informację seismologiczną i geologiczną, ale zagrożenie sejsmiczne jest szacowane inaczej. Wybór metody podyktowany jest np. wielkością zagrożenia sejsmicznego na badanym obszarze i jakością katalogów sejsmicznych. Scenariusz deterministyczny budowany jest w oparciu o jedno lub kilka najsilniejszych trzęsień ziemi w rozpatrywanym rejonie, zakładając możliwość pojawienia się w przyszłości jednego lub kilku trzęsień ziemi o magnitudach większych o pół rzędu od najsilniejszych trzęsień ziemi. Wielkość parametrów drgań gruntu odpowiadających poziomom trzęsienia ziemi estymowana jest na podstawie seismogramów syntetycznych obliczonych dla parametrów założonego w scenariuszu źródła sejsmicznego, położenia jego hipocentrum oraz budowy geologicznej podłoża. Jednym z końcowych wyników analizy jest mapa rozkładu maksymalnych bezwzględnych przyspieszeń drgań gruntu dla rozpatrywanego regionu. W przypadku podejścia probabilistycznego źródła sejsmiczne i efekty ich występowania rozważane są jako zjawiska probabilistyczne. Na tej podstawie szacowane są, w postaci prawdopodobieństw, potencjalne możliwości wystąpienia drgań sejsmicznych (np. Cornell, 1968; Reiter, 1991; McGuire, 1993). Końcowym wynikiem PAHS jest mapa wartości parametrów drgań gruntu, których prawdopodobieństwo przewyższenia w rozpatrywanym okresie czasu ma z góry zadaną wartość. Obecnie IAEA zaleca wykorzystanie obu podejść w analizie zagrożenia sejsmicznego (IAEA, 2002).

Polska jest krajem o bardzo słabej aktywności sejsmicznej. W katalogu sejsmicznym skompilowanym w Instytucie Geofizyki PAN znajduje się około 100 zjawisk sejsmicznych pochodzących z okresu historycznego i obserwacyjnego. Z tego względu dla potrzeb określenia lokalizacji obiektu jądrowego rekomenduje się zastosowanie w analizie zagrożenia sejsmicznego podejścia deterministycznego. Rekomenduje się wprowadzenie PAHS jako metody uzupełniającej w rejonach, w których liczba zjawisk sejsmicznych pozwala na jej przeprowadzenie z rozsądną niepewnością. W innych rejonach PAHS może być prowadzona, o ile dostępne będą uzupełniające dane pomiarowe np. dotyczące słabszej sejsmiczności.

Analiza hazardu sejsmicznego wymaga identyfikacji źródeł sejsmicznych generujących trzęsienia ziemi i ich modelu. Dotyczy to zarówno stref dyfuzyjnych, gdzie występującą sejsmiczność trudno przypisać do istniejących uskoku, jak i aktywnych uskoku. Wiedza o sejsmiczności danego rejonu jest gromadzona w postaci katalogów historycznych trzęsień ziemi oraz katalogów trzęsień ziemi z okresu obserwacji instrumentalnych. Okres czasu

zawarty w katalogach może być jednak niewystarczający do określenia średnich okresów powrotu większych trzęsień ziemi. Włączenie do analizy danych paleosejsmologicznych może wydłużyć okres, z którego pochodzą dane sejsmologiczne. Należy jednak uwzględnić znaczną niepewność danych paleosejsmologicznych, które nie zawierają informacji o zjawiskach, w których strefa pęknięcia nie osiągnęła powierzchni ziemi (tzw. ślepe uskoki).

Jak już wcześniej wspomniano, oba podejścia, probabilistyczne, jak i deterministyczne, wykorzystują te same dane wejściowe do oceny maksymalnego potencjału sejsmicznego. Dlatego dane wejściowe w obu analizach zostaną przedstawione razem.

### I.1.1. Parametry wejściowe

W procesie identyfikacji potencjału sejsmicznego w makroregionie, regionie i obszarze lokalizacji obiektu jądrowego wymagana jest znajomość:

liczby wstrząsów, które wystąpiły w okresie historycznym lub zostały zarejestrowane instrumentalnie w makroregionie, regionie i obszarze lokalizacji z uwzględnieniem ich charakterystyk:

- lokalizacji wstrząsu
- intensywności
- magnitudy
- czasu wystąpienia
- typu wstrząsu

W przypadku wstrząsów rejestrowanych w ramach monitoringu sejsmicznego rejonu lokalizacji także:

- mechanizmu wstrząsu;
- skalarnego momentu sejsmicznego;
- charakterystyki spektralnej wstrząsu;
- obecności uskoków i stref uskokowych, ich geometrycznego przebiegu, głębokości i rozmiaru struktur tektonicznych;
- względnych przesunięć (deformacji) geodynamicznych w makroregionie i regionie lokalizacji;

W celu poprawnej identyfikacji potencjału sejsmicznego analizowanego makroregionu należy przygotować katalog sejsmiczny do przeprowadzenia analizy zagrożenia sejsmicznego. W tym celu należy:

- wybrać odpowiednią jednorodną skalę magnitud;
- określić magnitudy dla każdego wstrząsu według przyjętej skali magnitud;
- zidentyfikować wstrząsy główne i oddzielić wstrząsy poprzedzające duże trzęsienie ziemi oraz wstrząsy następcze;
- ustalić kompletność katalogu w funkcji magnitudy, lokalizacji i czasu wystąpienia;
- ocenić jakość zebranych danych wraz z oceną niepewności wszystkich parametrów katalogu.

Wybrana skala magnitud powinna być zgodna ze skalą przyjętą w estymacji relacji tłumienia drgań ośrodka skalnego i w transformacji skali intensywności do skali magnitud. Przyjęta skala magnitud powinna liniowo zależeć od skali magnitudy momentu sejsmicznego ( $M_w$ ) w

zakresie istotnych z punktu zagrożenia sejsmicznego magnitud, aby uniknąć efektu saturacji magnitud.

Dla struktur sejsmogenicznych, które mogą być źródłem zagrożenia sejsmicznego, a znajdują się w odległości do 100 km od lokalizacji obiektu jądrowego, powinny być określone charakterystyki takie, jak rozmiar i geometria struktury, wielkość i kierunek przemieszczenia, maksymalne historyczne trzęsienie ziemi, paleosejsmologiczne wstrząsy sejsmiczne. Charakterystyka struktur powinna być również oparta o porównanie z podobnymi strukturami, dla których dane historyczne są dostępne.

### I.1.2. Ocena występowania wstrząsów naturalnych - podejście deterministyczne

- a. Obszar, dla którego opracowano model sejsmotektoniczny, należy podzielić na strefy sejsmogeniczne, czyli prowincje sejsmotektoniczne odpowiadające sejsmiczności dyfuzyjnej oraz struktury sejsmogeniczne. Podział powinien być dokonany w taki sposób, aby każda strefa była jednorodna sejsmogenicznie.
- b. Na podstawie wszystkich dostępnych danych dla każdej strefy sejsmogenicznej należy zidentyfikować zjawiska o potencjalnie największej sile oddziaływania w miejscu lokalizacji obiektu jądrowego w jednostce czasu, tzw. **Prawdopodobne Maksymalne Historyczne Trzęsienie Ziemi**. Prócz tego, dla warunków polskich na potrzeby lokalizacji obiektów jądrowych wymagana jest identyfikacja *PMHTZ 10 000 lat*, czyli Prawdopodobnego Maksymalnego Historycznego Trzęsienia Ziemi w ciągu ostatnich 10 000 lat.
- c. Dla każdej struktury sejsmogenicznej należy przyjąć, że *PMHTZ* zlokalizowane było w punkcie struktury znajdującym się najbliżej obszaru lokalizacji obiektu jądrowego, uwzględniając przy tym również fizyczne rozmiary źródła sejsmicznego. Jeżeli obszar lokalizacji znajduje się w granicach danej struktury sejsmogenicznej zaleca się przyjęcie założenia, że potencjalnie największe zjawisko wystąpiło pod obszarem lokalizacji.
- d. Dla strefy dyfuzyjnej, w której nie ma żadnej struktury sejsmogenicznej, a w której znajduje się region lokalizacji obiektu jądrowego zakłada się, że *PMHTZ* wystąpi w pewnej odległości od obiektu jądrowego. Najczęściej odległość ta wynosi od kilku do 20km i może być uzależniona od oszacowania głębokości ogniska trzęsienia ziemi oraz od fizycznego rozmiaru źródła. Precyzyjne oszacowanie tej odległości powinno być poprzedzone odpowiednio udokumentowaną analizą parametrów ogniska trzęsienia ziemi.
- e. Dla strefy dyfuzyjnej, w której nie znajduje się region lokalizacji obiektu jądrowego zakłada się, że *PMHTZ* wystąpi na granicy tej strefy w punkcie znajdującym się najbliżej obszaru lokalizacji obiektu jądrowego.
- f. Zaleca się przyjęcie założenia, że Maksymalne Obliczeniowe Trzęsienie Ziemi w strefie sejsmogenicznej jest silniejsze od *PMHTZ* o połowę rzędu magnitudy, 0.5.

#### I.1.2.1. Parametry wynikowe

Wynikowymi wielkościami opisującymi sejsmiczność regionu lokalizacji są:

- a. mapa sejsmiczności, mapa podziału na strefy sejsmogeniczne;

- b. wartość *MOTZ* w każdej strefie sejsmogenicznej;
- c. lokalizacja obiektu w stosunku do *MOTZ* - odległość od źródła sejsmicznego;
- d. wartość *ETZ* odpowiadająca połowie *MOTZ*;
- e. lokalizacja obiektu w stosunku do *ETZ* - odległość od źródła sejsmicznego.

### **I.1.2.2. Interpretacja wyników oceny sejsmiczności obszaru dla celów projektowych**

Przyjmuje się, że w danej strefie sejsmogenicznej może wystąpić trzęsienie ziemi o sile oddziaływania na obiekt jądrowy opisanej przez *MOTZ* w ciągu okresu funkcjonowania obiektu jądrowego w odległości źródłowej najbliższej lokalizacji obiektu jądrowego.

### **I.1.2.3. Ocena wiarygodności i jakości danych**

- a. Podział obszaru badań na strefy źródłowe odgrywa bardzo istotną rolę w estymacji *MOTZ*. Dlatego należy ocenić niepewność uzyskanych wyników w zależności od przyjętego podziału na strefy sejsmogeniczne.
- b. Oszacowanie magnitudy i lokalizacji zjawisk sejsmicznych na podstawie wartości intensywności wymaga wyboru odpowiedniego modelu tłumienia energii sejsmicznej wraz z odległością od źródła sejsmicznego oraz wyboru odpowiedniej relacji łączącej skalę intensywności ze skalą magnitud. Na podstawie stopnia wiarygodności tego modelu i tej relacji każdemu zjawisku sejsmicznemu należy przypisać parametr określający wiarygodność jego estymacji.

### **I.1.3. Oceny prawdopodobieństwa wystąpienia wstrząsów naturalnych - podejście probabilistyczne**

- a. Należy zidentyfikować wszystkie źródła sejsmiczne, które mogą powodować drgania gruntu w obszarze obiektu jądrowego. Procedura ta powinna wykorzystywać wszystkie elementy tworzenia modelu sejsmotektonicznego i parametry tego modelu.
- b. Obszar należy podzielić na strefy sejsmogeniczne. Podział powinien być dokonany w taki sposób, aby każda strefa była jednorodna sejsmogenicznie. Należy przyjąć, że sejsmiczność jest reprezentowana przez źródła sejsmiczne traktowane jako zjawiska niezależne. Jednorodność sejsmiczności w strefie powinna być potwierdzona testami statystycznymi.
- c. Jeśli jest to możliwe, dla każdej strefy sejsmogenicznej należy wyznaczyć probabilistyczne charakterystyki sejsmiczności. W tym celu powinno się wybrać:
  - model rozkładu liczby zdarzeń w stałym okresie czasu. Najczęściej do tego celu przyjmuje się stacjonarny rozkład Poissona;
  - model rozkładu powierzchniowego źródeł sejsmicznych. Najczęściej przyjmuje się, że położenie źródeł w strefie ma rozkład równomierny;
  - model rozkładu wielkości źródła sejsmicznego, inaczej model rozkładu powtarzalności wstrząsów sejsmicznych. Najczęściej stosowany w sejsmologii rozkład wielkości zdarzeń sejsmicznych wynikający z relacji Gutenberga-Richtera jest lewostronnie obciążonym rozkładem wykładniczym (np. Aki, 1965), gdzie obciążenie wynika z ustalonego progu kompletności katalogu sejsmicznego. Należy również

założyć istnienie fizycznej górnej granicy wyzwolonej energii sejsmicznej, której przekroczenie nie jest możliwe ze względu na ograniczenia wynikające z cech fizykochemicznych górotworu (np. Kijko i Sellevoll, 1989, 1992). W konsekwencji takiego założenia rozkład magnitudy przyjmuje formę dwustronnie obciętego rozkładu wykładniczego (Page, 1968; Cosentino et al., 1977).

- a. Należy wyznaczyć maksymalną magnitudę trzęsienia ziemi oraz okresy powrotu poszczególnych magnitud w strefach sejsmogenicznych.
- b. Jeśli strefa sejsmogeniczna jest tożsama uskoku, maksymalną magnitudę należy oszacować w oparciu o dane paleosejsmologiczne, historyczne i o parametry geometryczne tej struktury sejsmotektonicznej.
- c. Jeśli strefę sejsmogeniczną tworzy sejsmiczność rozproszona, maksymalna magnituda może być oszacowana na podstawie magnitudy największego historycznego lub jeśli zostało zidentyfikowane, najsilniejszego paleosejsmologicznego trzęsienia ziemi zwiększonej o pół jednostki magnitudy, czyli o 0.5.
- d. Możliwe są również do przyjęcia inne przybliżenia maksymalnej magnitudy, np. na podstawie statystycznej analizy katalogu wstrząsów dla danej struktury (rozkład magnituda-częstość) (np. Kijko i Funk, 1994; Pisarenko i inni, 1996).

#### **I.1.3.1. Parametry wynikowe**

- a. Parametrem wynikowym powinien być rozkład wartości maksymalnej magnitudy wraz z parametrami odzwierciedlającymi niepewność estymacji (np. przedziały ufności) lub alternatywne wartości maksymalnej magnitudy z przypisanymi wagami określającymi niepewność estymacji.
- b. Parametrami wynikowymi są również estymaty, wraz z błędem estymacji, parametrów rozkładu powtarzalności wstrząsów, rozkładu liczby zdarzeń w stałym okresie czasu oraz rozkładu lokalizacji wstrząsów w strefach sejsmogenicznych.

#### **I.1.3.2. Interpretacja wyników oceny sejsmiczności obszaru dla celów projektowych**

Przyjmuje się, że w danej strefie sejsmogenicznej mogą wystąpić trzęsienia ziemi o sile oddziaływania na obiekt jądrowy opisanej przez rozkład wielkości źródeł sejsmicznych wraz z maksymalną magnitudą w ciągu okresu funkcjonowania obiektu jądrowego.

#### **I.1.3.3. Ocena wiarygodności i jakości danych**

- a. Niezależnie od przybliżenia, czy też kombinacji użytych przybliżeń, określenie maksymalnej możliwej magnitudy jest obarczone niepewnością, która powinna być oszacowana.
- b. Alternatywne rozkłady lokalizacji źródeł sejsmicznych lub ich parametrów mogą zostać przygotowane z odpowiednimi wagami przedstawiającymi stopień ich wiarygodności i tak uwzględniane w analizie.
- c. Jeśli istnieje wątpliwość, czy wydzielona strefa sejsmogeniczna jest aktywna, również należy to uwzględnić w analizie wiarygodności wyników, określając prawdopodobieństwo jej aktywności.
- d. Należy zbadać wpływ przyjętej wartości maksymalnej magnitudy na wyniki analizy hazardu sejsmicznego. Jedną z możliwych do wykorzystania metod jest metoda

drzewa logicznego (np. Cornell i Merz, 1975; Coppersmith i Young, 1986). Drzewo logiczne jest schematem decyzyjnym składającym się z gałęzi i węzłów, reprezentujących pewien wybór z przypisanym prawdopodobieństwem stopnia zaufania eksperta do wyboru.

#### **I.1.4. Ocena występowania wstrząsów indukowanych**

Zgodnie z kryteriami rozporządzenia, występowanie sejsmiczności indukowanej działalnością ludzką w regionie lokalizacji obiektu jądrowego może negatywnie weryfikować daną lokalizację. W stosunku do sejsmiczności indukowanej można zastosować uproszczone postępowanie, którego celem jest weryfikacja, czy działalność sejsmogeniczna w regionie lokalizacji miała miejsce w ciągu ostatnich 60 lat, czy jest aktualnie prowadzona lub czy taka działalność jest planowana w przyszłości oraz, jeśli uzyskane wyniki są twierdzące – czy działalność ta powodowała, powoduje lub może powodować negatywne skutki, np. w postaci szkód górniczych, z oceną ich potencjalnego wpływu na obiekt jądrowy.

##### **I.1.4.1. Parametry wejściowe i wynikowe**

- a. Należy opisać zarejestrowaną aktywność sejsmiczną w regionie lokalizacji, w promieniu do 30 km z podaniem:
  - liczby rejestrowanych wstrząsów
  - lokalizacji wstrząsów
  - magnitud wstrząsów
  - rejestrowanego poziomu drgań gruntu (*PGA*) w obszarze lokalizacji i jego charakterystyki częstotliwościowej.
- b. Należy przeprowadzić analizę (deterministyczne oszacowanie) ewentualnie planowanej działalności górniczej lub innej mogącej indukować sejsmiczność w regionie lokalizacji.
- c. Należy podać informację o obecności budowli hydrotechnicznych oraz innych źródeł w regionie lokalizacji mogących generować sejsmiczność.

##### **I.1.4.2. Interpretacja wyników oceny sejsmiczności obszaru dla celów projektowych**

Zebrany sejsmologiczny materiał pomiarowy powinien posłużyć do oceny hazardu sejsmicznego w obszarze lokalizacji wykonanej analogicznymi metodami jak w przypadku oceny sejsmiczności naturalnej.

## II. METODYKA OCENY HAZARDU SEJSMICZNEGO

W PAHS hazard sejsmiczny, czyli zagrożenie sejsmiczne, jest zdefiniowany jako wielkość drgań gruntu z rocznym prawdopodobieństwem przekroczenia, obliczona na podstawie modelu matematycznego opartego na statystycznym związku pomiędzy trzęsieniami ziemi, a drganiami gruntu. Wynik końcowy zawiera łączny efekt od wszystkich możliwych źródeł sejsmicznych i ich położzeń.

W DAHS zagrożenie sejsmiczne jest zdefiniowane jako wielkość drgań gruntu związana z najmniej korzystną kombinacją wielkości źródła i jego położenia, obliczona na podstawie statystycznego związku drgań podłoża i trzęsień ziemi. Wynik końcowy zawiera efekty od źródła sejsmicznego z odpowiedniej odległości, które dało najsilniejsze drgania gruntu w badanym obszarze. Kluczowa składowa w obu podejściach to relacje tłumienia drgań gruntu, tzw. **P**redykcyjne **R**ównania **D**rgań **P**odłoża, *PRDP*, (Ground Motion Prediction Equation).

- a. Drgania gruntu należy opisać za pomocą składowych poziomej i pionowej *PGA* oraz za pomocą przyspieszeniowych spektrów odpowiedzi, czyli zależności maksymalnej amplitudy przyspieszenia drgań oscylatora harmonicznego o jednym stopniu swobody dynamicznej, poddanego wymuszeniu kinematycznemu w postaci drgań podłoża, od okresu drgań własnych i tłumienia tego oscylatora.
- b. Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi powinny być wyznaczone w trzech prostopadłych kierunkach drgań.
- c. Spektra odpowiedzi na wymuszenie przyspieszeniami drgań gruntu generowanymi wstrząsami z obszaru lokalizacji obiektu jądrowego powinny być liczone bezpośrednio dla obu poziomów zagrożeń SL-1 i SL-2.
- d. Alternatywnie można wybrać znormalizowane spektra odpowiedzi, w których wartości amplitud spektralnych dzielone są przez wartość szczytową przyspieszenia drgań gruntu.
- e. Jeśli to możliwe, spektrum odpowiedzi należy obliczyć z sygnałów akcelerometrycznych zarejestrowanych na obszarze lokalizacji. W przeciwnym razie do oceny spektrów odpowiedzi dla obszaru lokalizacji mogą zostać wykorzystane spektra odpowiedzi pochodzące z obszaru o podobnych charakterystykach sejsmicznych, geologicznych i gruntu oraz doświadczanego przyspieszeniami drgań gruntu podobnymi do spodziewanych w obszarze lokalizacji obiektu jądrowego.
- f. Dla liniowych obiektów podziemnych powinny zostać wyznaczone właściwe dla tych obiektów spektra odpowiedzi. Obliczenia powinny być prowadzone we współpracy z projektantami obiektów liniowych.
- g. Należy opracować predykcyjne równania drgań podłoża, *PRDP*, dla wartości szczytowych składowych przyspieszenia drgań gruntu lub, jeśli jest to możliwe, dla amplitud przyspieszeniowych spektrów odpowiedzi dla wybranych okresów drgań własnych dla obszaru lokalizacji obiektu jądrowego, oraz oszacować niepewność estymacji parametrów drgań poprzez *PRDP*.
- h. Należy wykorzystać predykcyjne równania drgań podłoża, które są właściwe dla miejsca lokalizacji obiektu jądrowego i które uwzględniają efekty lokalne. Zmienne wyjaśniające w *PRDP* powinny uwzględniać zarówno głębokość, jak i dynamiczne własności miejsca odbioru drgań. Klasyfikator gruntu powinien być włączony jako parametr wyjaśniający do *PRDP*.

- i. Jakość i istotność związku zmiennych wyjaśniających i wyjaśnianych powinna zostać zbadana w oparciu o odpowiednie testy i wielkości statystyczne, m.in. współczynnik determinacji, analizę wartości resztowych i inne.

## II.1. Ocena hazardu sejsmicznego dla wstrząsów naturalnych - podejście deterministyczne

- a. W projekcie budowy obiektów jądrowych powinno zostać uwzględnione zagrożenie sejsmiczne odpowiadające przyspieszeniom drgań gruntu charakterystycznym dla drugiego poziomu zagrożenia sejsmicznego, SL-2. Rekomendowany założony minimalny poziom drgań gruntu odpowiada projektowej wartości drgań nie mniejszej niż wartość rzędu 0.1g dla składowej poziomej przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi dla okresu zero, czyli dla wartości szczytowej składowej poziomej przyspieszenia drgań gruntu.
- b. Należy ocenić indywidualny wpływ *MOTZ* wyznaczonych dla wszystkich stref sejsmogenicznych dla odpowiednich odległości źródłowych.

### II.1.1. Parametry wejściowe i wynikowe

- a. Podstawowymi parametrami wejściowymi są:
  - mapa sejsmiczności, mapa podziału na strefy sejsmogeniczne;
  - wartość *MOTZ* w każdej strefie sejsmogenicznej;
  - lokalizacja obiektu w stosunku do *MOTZ* - odległość od źródła sejsmicznego;
  - wartość *ETZ* odpowiadająca połowie *MOTZ*;
  - lokalizacja obiektu w stosunku do *ETZ* - odległość od źródła sejsmicznego;
  - charakterystyka miejsca posadowienia obiektu pod kątem reakcji na drgania – charakterystyka efektów lokalnych;
  - rzeczywiste lub syntetyczne sygnały przyspieszenia drgań gruntu.
- a. Sygnały powinny zadowalająco odzwierciedlać możliwą różnorodność parametrów drgań gruntu, wliczając w to również czas trwania drgań. Liczba sygnałów niezbędnych do użycia w analizie i procedury wykorzystane do generowania sygnałów powinny być zależne od typu wykonywanej analizy.
- b. Należy przyjąć jedną definicję czasu trwania drgań gruntu. Należy wziąć pod uwagę, że lokalne efekty powierzchniowe mogą zmieniać czas trwania drgań gruntu.
- c. Metody generowania sygnałów syntetycznych mogą opierać się na różnych danych takich jak:
  - zapisy akcelerometryczne otrzymane z otoczenia obszaru lokalizacji lub ich odpowiednie modyfikacje, otrzymane w wyniku skalowania wartości szczytowej przyspieszenia, stosowanie filtrów o odpowiedniej częstotliwości lub kombinacji zapisów;
  - zapisy akcelerometryczne otrzymane z zupełnie innych obszarów, które charakteryzują się podobną sytuacją sejsmiczną, podobnymi warunkami geologicznymi i podobnym ukształtowaniem terenu; w niektórych przypadkach takie zapisy mogą wymagać modyfikacji amplitudy oraz częstotliwości, aby stały się bardziej odpowiednie do stosowania do analiz obszaru lokalizacji obiektu jądrowego;
  - syntetyczne czasy trwania zjawisk powinny być generowane dla różnych wartości *PGA* i okresów drgań własnych z uwzględnieniem charakterystyki źródła,

- warunków propagacji fal i efektów lokalnych tak, by w stopniu dostatecznym określić charakterystyki drgań gruntu w obszarze lokalizacji obiektu jądrowego.
- a. Wynikiem DAHS są spektra odpowiedzi na wymuszenie przyspieszeniami drgań gruntu generowanymi poszczególnymi *MOTZ*, dla składowych poziomych i pionowych dla odpowiednich wartości tłumienia (5%) i okresów (od dziesiątych części Hz do kilkudziesięciu Hz). Należy przygotować zbiór estymowanych spektrów odpowiedzi odpowiadających wartości oczekiwanej, medianie oraz 80-cio, 90-cio i 95-cio procentowemu przedziałowi ufności.
  - b. *PGA* i spektra odpowiedzi dla składowych poziomych i pionowych muszą reprezentować zakres okresów istotnych z punktu widzenia budowy obiektu jądrowego.

## **II.2. Ocena hazardu sejsmicznego dla wstrząsów naturalnych - podejście probabilistyczne**

- a. W projekcie budowy obiektów jądrowych powinno zostać uwzględnione zagrożenie sejsmiczne odpowiadające przyspieszeniom drgań gruntu charakterystycznym dla drugiego poziomu zagrożenia sejsmicznego, SL-2. Rekomendowany minimalny poziom drgań gruntu odpowiada projektowej wartości drgań gruntu, dla której średnie roczne prawdopodobieństwo przekroczenia wynosi  $10E-5$ , ale nie mniejszej niż wartość rzędu 0.1g dla składowej poziomej przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi dla okresu zero, czyli wartości szczytowej składowej poziomej przyspieszenia drgań gruntu.
- b. Należy ocenić indywidualny wpływ źródeł sejsmicznych, ich magnitud i położenia na wartość hazardu sejsmicznego w procesie deagregacji średniej całkowitej wartości rocznej prawdopodobieństwa przewyższenia przyspieszeń drgań gruntu w obszarze lokalizacji obiektu jądrowego. Model deagregacji powinien być wykonany dla co najmniej dwóch spektrów odpowiedzi przy 1Hz i 10Hz. Deagregacja może być wykorzystana do określenia wartości magnitudy i odległości epicentralnej, które mają największy wpływ na drgania gruntu przy wybranych okresach spektrów odpowiedzi. Są to tzw. sterujące trzęsienia ziemi.

### **II.2.1. Parametry wejściowe i wynikowe**

- a. Podstawowymi parametrami wejściowymi są:
  - maksymalna wielkość i inne charakterystyki trzęsień ziemi w strefach sejsmogenicznych - maksymalna magnituda, średnia częstość zjawisk w jednostce czasu o magnitudzie powyżej ustalonej wartości, rozkład magnitudy;
  - mapa sejsmiczności, mapa podziału na strefy sejsmogeniczne;
  - lokalizacja obiektu w stosunku do trzęsień - odległość od źródła;
  - charakterystyka miejsca lokalizacji obiektu;
  - sygnały syntetyczne przyspieszeń drgań gruntu, wyznaczone zgodnie z zaleceniami zawartymi w punktach II.1.1.
- b. Wynikiem PAHS są estymaty krzywych hazardu wyrażone jako wartości, w jednostce czasu (najczęściej rok), estymowanego prawdopodobieństwa tego, że dany parametr drgań gruntu, wartość szczytowa przyspieszenia, wartość spektrum odpowiedzi, będzie równy lub większy niż dana wartość, w funkcji wartości parametru drgań gruntu.

- Należy przygotować zbiór estymowanych krzywych hazardu sejsmicznego odpowiadających wartości oczekiwanej, medianie oraz 80-cio, 90-cio i 95-cio procentowemu przedziałowi ufności dla prawdopodobieństwa przewyższenia wartości parametru drgań gruntu w jednostce czasu (roku).
- c. Parametr drgań gruntu (np. *PGA* i spektra odpowiedzi dla składowych poziomych i pionowych) musi reprezentować zakres okresów istotnych z punktu widzenia budowy obiektu jądrowego.
  - d. W miarę możliwości należy wyznaczyć jednorodne spektra hazardu, czyli, przy zadanej wartości rocznego prawdopodobieństwa przewyższenia, średnia wartość i percentyle rzędu 0.025, 0.05, 0.15, 0.85, 0.95, 0.975 amplitud spektrów odpowiedzi dla różnych okresów i ustalonego poziomu tłumienia oscylatora.
  - e. Dodatkowym wynikiem końcowym PAHS powinna być mapa wartości parametrów drgań gruntu, których prawdopodobieństwo przewyższenia w rozpatrywanym okresie czasu ma z góry zadaną wartość.

## II.3. Ocena hazardu sejsmicznego dla wstrząsów indukowanych

### II.3.1. Metodologia przeprowadzania oceny

Występowanie sejsmiczności indukowanej w potencjalnym zasięgu oddziaływania na bezpieczeństwo jądrowe obiektu jądrowego oznacza konieczność przeprowadzenia rozszerzonej analizy sejsmiczności indukowanej, w tym oceny hazardu sejsmicznego oraz ewentualnych symulacji numerycznych oddziaływania sejsmicznego planowanych inwestycji na obszar lokalizacji obiektu jądrowego.

Proces oceny sejsmiczności indukowanej/wyzwalanej w regionie lokalizacji musi być przeprowadzony bardzo starannie z uwzględnieniem wszystkich dostępnych materiałów pomiarowych i historycznych. W szczególności za konieczne uważamy przeprowadzenie symulacji możliwych scenariuszy wystąpienia wstrząsów i ich oddziaływania na infrastrukturę obiektu jądrowego.

Analiza sejsmiczności indukowanej/wyzwalanej w regionie lokalizacji powinna obejmować dwa etapy: A i B. Celem pierwszego z nich (etap A) jest wykazanie braku aktywności sejsmicznej w obszarze lokalizacji. Wystąpienie takiej aktywności w okresie 60 lat poprzedzających rozpoczęcie analizy danej lokalizacji absolutnie wyklucza daną lokalizację. Ponadto, należy przeprowadzić ocenę planów zagospodarowania i rozwoju w regionie lokalizacji pod kątem powstania obiektów mogących być źródłem sejsmiczności indukowanej lub wyzwalanej takich jak np. kopalnie, kamieniołomy, odkrywki, podziemne magazyny, obiekty hydrotechniczne, itp. W przypadku istnienia lub planowania takich obiektów w regionie lokalizacji należy wykonać symulacje numeryczne umożliwiające ocenę generowanego przez nie hazardu sejsmicznego.

Pozytywne wyniki etapu A pozwalają przejść do etapu B, w ramach którego należy przeprowadzić analizy etapów II i III opisanych w części pierwszej niniejszego opracowania w ramach omawiania oceny sejsmiczności naturalnej. Ponadto należy uzupełnić przedstawioną tamże analizę o wykonanie symulacji komputerowych pozwalających ocenić poziomy drgań gruntu (*PGA/PGV*) dla realistycznych i ekstremalnych

indukowanych/wyzwalanych zjawisk sejsmicznych mogących wystąpić w regionie lokalizacji.

Poniżej przedstawiono wymagania odnośnie potrzebnych informacji, danych, koniecznych analiz i wyników raportu w stosunku do etapów A i B.

## **Etap A**

Celem pierwszego etapu oceny sejsmiczności indukowanej dla rozważanej lokalizacji jest weryfikacja, czy działalność sejsmogeniczna w obszarze lokalizacji miała miejsce w ciągu ostatnich 60 lat, jest aktualnie prowadzona lub czy planowane są takie działania w przyszłości. Rozpoznanie takie prowadzone powinno być w oparciu o dwa elementy, a mianowicie analizę dokumentacji działalności gospodarczej w rejonie lokalizacji i planów na przyszłość oraz monitoring sejsmologiczny regionu lokalizacji. Proponuje się, by stwierdzenie aktywności tego typu na poziomie wstrząsów o magnitudzie powyżej 2 wykluczało daną lokalizację. Przez wystąpienie aktywności w obszarze lokalizacji rozumie się sytuację, gdy w obszarze lokalizacji znajdowało się epicentrum wstrząsu lub gdy elipsa błędów lokalizacji wstrząsu wyznaczona dla pojedynczego odchylenia standardowego przecina się z obszarem lokalizacji. Wynikiem przeprowadzonej oceny obszaru lokalizacji w zakresie sejsmiczności indukowanej powinny być następujące informacje [przedstawione w raporcie lokalizacyjnym]:

1. występowanie sejsmiczności indukowanej w ciągu ostatnich 60 lat
2. prowadzenie prac górniczych lub podobnych mogących indukować aktywność sejsmiczną
3. obecność budowli hydrotechnicznych lub innych budowli geotechnicznych w regionie lokalizacji mogących generować sejsmiczność w obszarze lokalizacji
4. informacje o bieżącej sejsmiczności w regionie lokalizacji z ciągłego monitoringu sejsmicznego prowadzonego nie krócej niż 2 lata z poziomem kompletności detekcji i lokalizacji wstrząsów w obszarze lokalizacji poniżej magnitudy 1.5 i pozostałych wymaganiach opisanych w *ZALECENIACH TECHNICZNYCH PREZESA PAŃSTWOWEJ AGENCJI ATOMISTYKI DOTYCZĄCYCH OCENY SEJSMICZNOŚCI PODŁOŻA DLA LOKALIZACJI OBIEKTÓW JĄDROWYCH* (roz. II.2.3.3)
5. informacje o rejestrowanym poziomie szumu sejsmicznego, mikrosejsm oraz poziomie drgań w obszarze lokalizacji wraz z wyznaczeniem odpowiednich charakterystyk częstotliwościowych,
6. ocena możliwości detekcyjnych sieci monitoringu sejsmicznego
7. ocena kompletności rejestracji
8. symulacje poziomu drgań gruntu przy wyznaczonym poziomie detekcyjnym sieci oraz wymaganej czułości rejestracji
9. informacje o zastosowanych technikach analizy danych pomiarowych
10. weryfikacja dokładności otrzymanych wyników
11. analiza prowadzonej w przeszłości i planowanej działalności górniczej lub innej mogącej indukować sejsmiczność w obszarze lokalizacji

W przypadku oceny negatywnej, to jest stwierdzenia występowania indukowanych lub wyzwalanych wstrząsów sejsmicznych w obszarze lokalizacji, należy podać charakterystykę zarejestrowanej aktywności sejsmicznej w regionie lokalizacji z uwzględnieniem co najmniej:

1. liczby rejestrowanych wstrząsów

2. lokalizacji wstrząsów i czasów ich wystąpienia
3. magnitud wstrząsów
4. oceny dokładności lokalizacji wstrząsów
5. rejestrowanego poziomu drgań gruntu (PGV/PGA) od danych wstrząsów w obszarze lokalizacyjnym i jego charakterystyki częstotliwościowe i przestrzenne.
6. informacji o pochodzeniu wstrząsów i typie wstrząsów.

Źródłem potrzebnych informacji są:

1. sieć monitoringu sejsmicznego
2. dokumentacja gospodarcza prowadzonej w przeszłości i ewentualnie planowanej działalności górniczej lub innej mogącej indukować sejsmiczność w regionie lokalizacji
3. analizy studyjne oceniające możliwości występowania sejsmiczności indukowanej w obszarze lokalizacji.

## **Etap B**

Celem etapu B jest ocena sejsmiczności indukowanej i związanego z nią hazardu dla regionu lokalizacji rozumianego jako strefa o promieniu do 30 km wokół granic planowanego miejsca usytuowania obiektu jądrowego. Ocena ta musi uwzględniać przeszłą, bieżącą jak i planowaną działalność ludzką mogącą indukować aktywność sejsmiczną. W związku z tym ten etap analizy rozpatrywanej lokalizacji wymaga analizy zarówno informacji historycznych, wyników bieżącego monitoringu oraz symulacji możliwych scenariuszy indukowania sejsmiczności w zakresie zmian obecnie prowadzonej działalności generującej tę sejsmiczność, czy planowania nowych inwestycji mogących taką aktywność wywoływać. Etap ten wymaga ponadto bardzo szczegółowego rozpoznania struktury w regionie lokalizacji, a zwłaszcza w obszarze lokalizacji, by ocenić możliwe oddziaływanie sejsmiczne na obiekt jądrowy oraz wyznaczyć zagrożenie sejsmiczne związane z pojawieniem się sejsmiczności wyzwalanej (ang. *triggered seismicity*). Na tym etapie analiz lokalizacyjnych należy wyróżnić trzy elementy:

1. rozpoznanie sejsmiczności indukowanej i jej charakterystyki, w tym zmienności czasowej
2. rozpoznanie struktury skorupy ziemskiej w regionie lokalizacji ze szczególnym uwzględnieniem budowy geologicznej najpłytszej jej części, sięgającej kilku kilometrów pod powierzchnią ziemi. Dokładny zakres głębokościowy prowadzonych badań powinien być zdeterminowany budową geologiczną obszaru badań oraz typem i zasięgiem głębokościowym działalności antropogenicznej, której efektem może być sejsmiczność indukowana.
3. symulacje zmian sejsmiczności

### **II.3.2. Parametry wejściowe i wynikowe**

W zakresie rozpoznania sejsmiczności indukowanej raport lokalizacyjny, jako wyniki przeprowadzonych badań, powinien zawierać:

1. informacje o bieżącej sejsmiczności w rejonie lokalizacji z ciągłego monitoringu sejsmicznego prowadzonego nie krócej niż 2 lata
2. sejsmologiczne charakterystyki źródeł wstrząsów
3. informacje geodezyjne (GPS) o ruchach i przemieszczeniach geodynamicznych regionu lokalizacji
4. występowanie sejsmiczności indukowanej w ciągu ostatnich 60 lat
5. prowadzenie prac górniczych lub podobnych mogących indukować aktywność sejsmiczną
6. obecność budowli hydrotechnicznych lub innych budowli geotechnicznych w regionie lokalizacji mogących generować sejsmiczność w obszarze lokalizacji
7. informacje o rejestrowanym poziomie szumu sejsmicznego, mikrosejsm oraz poziomie drgań związanych w rejonie lokalizacji wraz z wyznaczeniem odpowiednich charakterystyk częstotliwościowych,
8. w przypadku, gdy z analizy prowadzonych informacji historycznych wynika, że w rejonie lokalizacyjnym występowały wstrząsy sejsmiczne o intensywności powyżej 5 w skali EMS-98 a brak jest danych pomiarowych, należy dostarczyć wyniki symulacji numerycznych poziomu drgań gruntu w obszarze lokalizacyjnym wywołanych ewentualnymi wstrząsami o magnitudach z zakresu 5 – 6.5 zlokalizowanych w obszarach, z których pochodzą informacje historyczne
9. informacje o zastosowanych technikach analizy danych pomiarowych
10. weryfikację dokładności otrzymanych wyników.

W zakresie rozpoznania struktury raport lokalizacyjny powinien zawierać:

1. informacje o strukturze skorupy w regionie lokalizacji do głębokości nie mniejszej niż 10 km uwzględniające:
  - rozkład prędkości fal P i S
  - rozkład gęstości
 a w obszarze lokalizacji:
2. szczegółowe informacje trójwymiarowe (3D) o strukturze podłoża w regionie lokalizacji do głębokości nie mniejszej niż 5 km otrzymane w wyniku kompilacji pomiarów wykonanych różnymi technikami geofizycznymi i z odwiertów geologicznych uwzględniających:
  - prędkości fal P i S
  - gęstość
  - współczynnik ścinania
  - współczynniki tłumienia fal P i S
3. informacje o obecności płytkich (do 5 km) uskoków i ich przeszłej aktywności.

Dla wyników analizy zarówno w regionie lokalizacji jak i obszarze lokalizacji należy podać:

1. informacje o zastosowanych technikach analizy danych pomiarowych
2. weryfikację dokładności otrzymanych wyników.

W zakresie symulacji zmian sejsmiczności należy podać:

1. Ocenę trendów czasowych zmian sejsmiczności indukowanej i jej charakterystyk
2. Jeżeli w regionie lokalizacji istnieją lub są planowane inwestycje mogące indukować wstrząsy sejsmiczne, należy wykonać:
  - pełne symulacje scenariuszy rozwoju możliwej aktywności indukowanej działalnością ludzką
  - analizę możliwości powstania sejsmiczności wyzwalanej w oparciu o wykonane rozpoznanie struktury skorupy w obszarze lokalizacji
  - ocenę sejsmologicznej charakterystyki sejsmiczności indukowanej i wyzwalanej
  - symulacje wielkości generowanych drgań gruntu w obszarze lokalizacji i ich charakterystyk częstotliwościowych.

Dla wyników analizy zmian sejsmiczności należy podać:

1. informacje o zastosowanych technikach analizy danych pomiarowych
2. wyniki symulacji, w tym syntetyczne sejsmogramy
3. weryfikację dokładności otrzymanych wyników.

W procesie zbierania i analizy danych potrzebnych do przeprowadzenia powyższych symulacji i analiz należy stosować się do wskazań opisanych w części dotyczącej analizy sejsmiczności naturalnej z uwzględnieniem wszystkich wymagań dla etapów II i III.

## **II.4. Ustalanie marginesów błędu**

- a. Należy ocenić dokładność i kompletność danych oraz przeprowadzić końcową ocenę błędu wyników.
- b. Każdy etap oceny hazardu sejsmicznego powinien zmierzać w kierunku redukcji niepewności.
- c. Należy uwzględnić wszystkie rodzaje niepewności na wszystkich etapach analizy.
- d. Niepewność aleatoryczna, tzn. niepewność wynikająca z losowego charakteru zmiennej, oraz niepewność epistemologiczna, tzn. niepewność poznania, związana z fragmentarycznym charakterem wiedzy, powinny być rozróżnione i ocenione w kolejnych etapach PAHS.

### **II.4.1. Dla danych studyjnych**

Nie można podać jednej metodyki postępowania, gdyż każda z metod pomiarowych posługuje się innymi technikami oceny błędów. Każdorazowo natomiast należy zweryfikować i ujednolicić dane archiwalne.

### **II.4.2. Dla danych z badań terenowych**

Nie można podać jednej metodyki postępowania, gdyż każda z metod pomiarowych posługuje się innymi technikami oceny błędów. Każdorazowo natomiast należy zastosować techniki ekstrapolacyjne z oceną błędów i niepewności.

## **II.5. Zarządzanie brakiem lub niekompletnością dostępnych danych**

- a. Do analizy zagrożenia sejsmicznego mogą zostać włączone dane spoza granic planowanego miejsca posadowienia obiektu jądrowego, np. dane akcelerometryczne do określenia predykcyjnych równań drgań gruntu. W takich sytuacjach należy zwrócić szczególną uwagę na niepewność wynikającą z takiego podejścia, uwzględniając ją w analizie hazardu sejsmicznego.
- b. W przypadku niekompletności danych sugeruje się podniesienie minimalnego projektowego przyspieszenia drgań gruntu o co najmniej 0.15g.

### **II.5.1. Ekstrapolacja danych**

Jeśli jest taka konieczność, należy zastosować techniki ekstrapolacyjne z oceną błędów i niepewności.

### **II.5.2. Ustalanie granicy błędu i zapasu bezpieczeństwa dla ekstrapolacji**

Należy zastosować standardowe procedury z przyjętym poziomem ufności 95%.

## **II.6. Interpretacja wyników oceny hazardu sejsmicznego dla celów projektowych**

- a. W podejściu deterministycznym na podstawie maksymalnych spektrów odpowiedzi wymuszonych przez *MOTZ* należy estymować projektowe przyspieszeniowe spektra odpowiedzi fundamentów obiektów jądrowych dla składowej poziomej i pionowej dla ustalonych okresów drgań.
- b. W podejściu probabilistycznym na podstawie oszacowanego jednego lub kilku sterujących trzęsień ziemi, odpowiadającego *MOTZ*, należy estymować projektowe przyspieszeniowe spektra odpowiedzi fundamentów obiektów jądrowych dla składowej poziomej i pionowej dla ustalonych okresów drgań dla referencyjnego prawdopodobieństwa przekroczenia.

### III. UWAGI OGÓLNE DOTYCZĄCE DOKUMENTACJI ANALIZY ZAGROŻENIA SEJSMICZNEGO

- a. Każdy etap analizy zagrożenia sejsmicznego oraz wyniki i wnioski powinny być udokumentowane w taki sposób, aby można było dokonać oceny metodyki i wyników analizy oraz aby można było, w razie potrzeby, zaktualizować analizę.
- b. Dokumentacja **Analizy Hazardu Sejsmicznego (AHS)** powinna być przygotowana w dwóch częściach:
  - pierwsza część składa się z dokumentacji, która musi być dołączona do raportu głównego;
  - druga część stanowi bardziej obszerny materiał dokumentujący poszczególne etapy analizy.
- c. Dokumentacja AHS powinna zawierać następujące elementy:
  - role i odpowiedzialności uczestników i konsultantów w projekcie;
  - odniesienie do innych (poprzednich) wyników AHS dla obszaru badań lub obszaru podobnego sejsmotektonicznie;
  - procedurę wewnętrznej kontroli jakości analizy i jej wyniki na poszczególnych etapach projektu;
  - szczegółowy opis metody oceny zagrożenia sejsmicznego;
  - wyniki AHS wraz z oceną niepewności i wrażliwości wyników AHS na przyjęte wartości parametrów. Zgodnie z wymogami rozporządzenia, należy również dołączyć pliki z danymi i wynikami każdego etapu projektu;
  - zewnętrzne recenzje metody i otrzymanych wyników AHS;
  - spis literatury

## IV. OPIS METODYKI OCENY HAZARDU SEJSMICZNEGO

### IV.1. Wstęp

Ocena hazardu sejsmicznego, rozumiana jako ocena zagrożenia spowodowanego sejsmicznością, jest bardzo istotnym zagadnieniem dla rejonów aktywnych sejsmicznie. Celem analizy hazardu sejsmicznego jest określenie w rozpatrywanym horyzoncie prognozy prawdopodobieństwa wystąpienia negatywnego w skutkach zjawiska fizycznego związanego z trzęsieniem ziemi. W przypadku kraju położonego w rejonie oddalonym od otwartego basenu morskiego najczęściej zjawiskiem fizycznym rozpatrywanym w analizie hazardu sejsmicznego jest drganie cząstek gruntu. Wówczas parametrem wyjściowym analizy jest powierzchniowy rozkład maksymalnych wartości parametrów drgań gruntu, najczęściej wartości szczytowej przyspieszenia drgań gruntu lub amplitud spektralnych przyspieszenia drgań podłoża. Regionalne i lokalne oceny hazardu są rutynowym krokiem poprzedzającym projektowanie na terenach sejsmicznych. Ogromne zainteresowanie analizą hazardu sejsmicznego doprowadziło do realizacji w ostatnich latach Programu Światowej Oceny Hazardu Sejsmicznego (*The Global Seismic Hazard Assessment Program – GSHAP*) w ramach ogłoszonej przez ONZ Międzynarodowej Dekady Zmniejszania Zagrożeń Naturalnych. W wyniku GSHAP dla całego globu utworzono mapy sejsmiczności i mapy hazardu sejsmicznego (Shedlock *i inni*, 2000). Dla obszaru Polski, jako części Regionu 3 GSHAP, również oszacowano zagrożenie sejsmiczne (Grunthal *i GSHAP Region 3 Working Group*, 1999). Wynikiem analizy była mapa hazardu sejsmicznego dla poziomej składowej wartości szczytowej przyspieszenia drgań gruntu z prawdopodobieństwem przekroczenia 10% w okresie 50 lat. W ramach tego projektu dla Regionu 3 GSHAP utworzono również nowy, jednolity katalog sejsmiczny (Grünthal Gottfried, Wahlström Rutger, 2003). Obszar Polski razem z Czechami i Słowacją był także przedmiotem kolejnej analizy zagrożenia sejsmicznego prowadzonej przez Schenk'a *i innych* w 2000 roku. W wyniku analizy otrzymano mapę intensywności oraz poziomej składowej wartości szczytowej przyspieszenia drgań gruntu z prawdopodobieństwem przekroczenia 10% w okresie 50 lat dla terytorium Republiki Czeskiej, Polski i Słowacji.

W oszacowaniu hazardu sejsmicznego wykształciły się dwa podejścia – deterministyczne i probabilistyczne. Wybór metody podyktowany jest najczęściej wielkością zagrożenia sejsmicznego na badanym obszarze oraz jakością danych pomiarowych (np. McGuire, 2001). Scenariusz deterministyczny budowany jest w oparciu o jedno lub kilka najsilniejszych trzęsień ziemi w rozpatrywanym rejonie, zakładając możliwość pojawienia się w przyszłości jednego lub kilku trzęsień ziemi o magnitudach większych o pół rzędu od najsilniejszych trzęsień ziemi. Wielkość parametrów drgań gruntu odpowiadających poziomom trzęsienia ziemi estymowana jest poprzez obliczone na podstawie parametrów źródła założonego w scenariuszu, położenia jego hipocentrum oraz budowy geologicznej podłoża sejsmogramy syntetyczne. Jednym z końcowych wyników analizy jest mapa rozkładu maksymalnych bezwzględnych przyspieszeń drgań gruntu dla rozpatrywanego rejonu. W przypadku podejścia probabilistycznego źródła sejsmiczne i efekty ich występowania rozważane są jako zjawiska probabilistyczne. Na tej podstawie szacowane są, w postaci prawdopodobieństw, potencjalne możliwości wystąpienia drgań sejsmicznych (np. Cornell, 1968; Reiter, 1991; McGuire, 1993). Końcowym wynikiem **Probabilistycznej Analizy Hazardu Sejsmicznego (PAHS)** jest mapa wartości parametrów drgań gruntu,

$a(x,y)$ , których prawdopodobieństwo przewyższenia,  $\Pr\{A > a(x,y)\}$ , w rozpatrywanym okresie czasu ma z góry zadaną wartość (np. McGuire, 1993). Probabilistyczna analiza hazardu sejsmicznego stosowana jest zazwyczaj w warunkach istnienia dużej bazy danych sejsmicznych.

## IV.2. Etapy analizy hazardu sejsmicznego

Stale rozwijane i udoskonalane algorytmy oceny hazardu sejsmicznego zamykają się w obrębie czterech głównych etapów analizy (np. Reiter, 1991):

1. identyfikacja potencjalnych źródeł sejsmicznych stanowiących zagrożenie sejsmiczne oraz podział badanego obszaru na strefy źródłowe jednorodnie sejsmogenicznie;
2. wyznaczanie charakterystyk sejsmiczności wydzielonych stref sejsmogenicznych;
4. wyznaczanie relacji tłumienia drgań gruntu, tzw. **P**redykcyjnych **R**ównań **D**rgań **P**odłoża, *PRDP*, (Ground Motion Prediction Equation) dla badanego rejonu;
5. zamiana oszacowanych charakterystyk sejsmiczności stref sejsmogenicznych poprzez *PRDP* w charakterystyki parametru drgań w ustalonym horyzoncie prognozy dla poszczególnych punktów obszaru badań.

Schemat ten został opracowany dla obszarów naturalnej aktywności sejsmicznej. W przypadku **D**eterministycznej **A**nalizy **H**azardu **S**ejsmicznego (DAHS) określa się najbardziej pesymistyczny scenariusz wystąpienia trzęsienia ziemi oraz wyznacza się dla takiego przypadku odpowiednie parametry drgań gruntu w danym miejscu. W PAHS wynik końcowy zawiera łączny efekt od wszystkich możliwych źródeł sejsmicznych i ich położań.

### IV.2.1. Wyznaczenie stref sejsmogenicznych

Prezentowany wyżej algorytm analizy hazardu sejsmicznego wskazuje na fundamentalne znaczenie charakterystyk sejsmiczności wydzielonych stref sejsmogenicznych. Na ich podstawie, poprzez odpowiednie relacje tłumienia, wnioskuje się o wielkości potencjalnych drgań sejsmicznych podłoża w poszczególnych punktach obszaru badań. Zanim jednak określi się parametry trzęsień ziemi, konieczna jest właściwa identyfikacja stref sejsmogenicznych. W obu podejściach, deterministycznym i probabilistycznym, proces ten jest taki sam i opiera się na wszystkich dostępnych danych sejsmologicznych, geologicznych i tektonicznych oraz mechanizmach i parametrach źródeł sejsmicznych.

Podstawowy zbiór danych wejściowych do analizy stanowi katalog sejsmiczny, czyli wykaz wszystkich zarejestrowanych lub, w przypadku historycznych trzęsień ziemi, odczuty przez okolicznych mieszkańców, trzęsień ziemi wraz z podaną ich lokalizacją, czasem wystąpienia i parametrami określającymi ich wielkość, takich jak magnituda lub intensywność. Katalog powinien być kompletny, co oznacza, że powinien zawierać pełną informację na temat wszystkich zdarzeń powyżej pewnej ustalonej wielkości zjawiska. Trudności w procesie przygotowania danych mogą wynikać z małej ilości dostępnych informacji z okresu sprzed rejestracji instrumentalnej, określanego jako historyczny. Dodatkowo, dane z takiego okresu, bazujące na subiektywnych odczuciach przypadkowych obserwatorów, czyli ludzi, którzy odczuli trzęsienie ziemi, mogą być obarczone błędem.

Tego typu sytuacja występuje na obszarach, gdzie poziom sejsmiczności jest stosunkowo nieduży. Do takich obszarów należy również Polska.

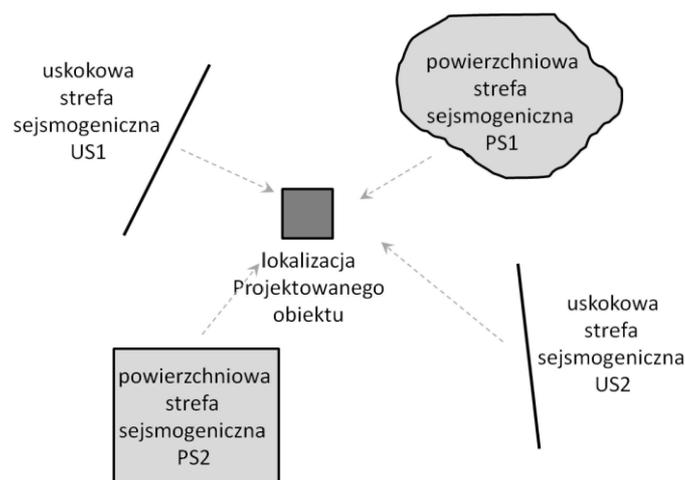
Okres czasu zawarty w katalogach może być niewystarczający do określenia średnich okresów powrotu największych trzęsień ziemi. Włączenie do analizy danych paleosejsmologicznych może wydłużyć okres, z którego pochodzą dane sejsmologiczne. Należy jednak uwzględnić znacząca niepewność danych paleosejsmologicznych, które nie zawierają informacji o zjawiskach, w których strefa pęknięcia nie osiągnęła powierzchni ziemi (ślepe uskoki).

Ważnym elementem przygotowania danych do analizy jest ich ujednoczenie. Zdarza się, że w katalogach sejsmologicznych parametry opisujące wielkość trzęsień ziemi są różne. Dotyczy to najczęściej różnych rodzajów magnitud. W takim wypadku ujednoczenie następuje poprzez przeliczenie różnych wielkości za pomocą odpowiednich relacji przeliczeniowych, tak aby wszystkie dane reprezentowane były w jednej skali.

Ponieważ różne rodzaje skał posiadają różne własności sprężyste, a co za tym idzie fale sejsmiczne propagują w nich z różną prędkością oraz tłumieniem, niezbędna jest wyczerpująca informacja geologiczna dotycząca badanego terenu. W najprostszym przypadku informacja taka zawarta jest w warstwowym modelu geologicznym, który informuje m.in. o prędkościach propagacji fal sejsmicznych (fali podłużnej P oraz fali poprzecznej S), gęstości ośrodka geologicznego oraz innych parametrach geomechanicznych, których znajomość wykorzystywana jest w obliczaniu relacji tłumienia. W celu wydzielenia stref sejsmogenicznych, potrzebna jest bardzo dobra znajomość tektoniki obszaru. W szczególności należy zwrócić uwagę na udokumentowane nieciągłości geologiczne takie jak uskoki tektoniczne. Wiedza tektoniczna jest szczególnie istotna w przypadku terenów o niskiej aktywności sejsmicznej, gdyż pozwala na identyfikację potencjalnych stref zagrożenia. Na podstawie informacji zawartych w katalogach sejsmicznych oraz wiedzy o geologii i tektonice obszaru, wydziela się strefy sejsmogeniczne (źródłowe), czyli strefy jednorodne pod względem sejsmiczności, dla których można w następnej kolejności wyznaczyć mechanizmy źródłowe wstrząsów.

Mechanizm zjawisk sejsmicznych w strefie określany jest m. in. za pomocą informacji uzyskanych z obserwacji instrumentalnej w procesie inwersji tensora momentu sejsmicznego lub metodą rozwiązania płaszczyzny uskoku (ang. fault plane solution). Określenie, która z płaszczyzn nodalnych jest płaszczyzną uskoku, można uzyskać łącząc informację sejsmologiczną z wiedzą geologiczną i tektoniczną. Analiza sejsmogramów w domenie częstotliwości (analiza spektralna sygnału sejsmicznego) w połączeniu z fizycznym modelem źródła sejsmicznego pozwala na wyznaczenie parametrów źródłowych takich jak promień ogniska, energia sejsmiczna, statyczny spadek naprężeń, a w szczególności skalarny moment sejsmiczny oraz magnituda momentu sejsmicznego. Wyznaczone w ten sposób parametry źródłowe z punktu widzenia fizyki najlepiej opisują sytuację w ognisku wstrząsu.

Strefę sejsmogeniczną może tworzyć strefa uskokowa, lub obszar z rozproszoną aktywnością sejsmiczną niestowarzyszoną z żadną strefą uskokową, rys. 1.



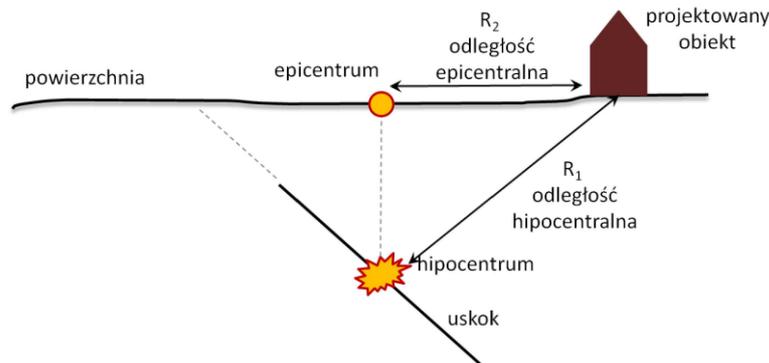
**Rys. 1.** Przykład stref sejsmogenicznych

## IV.2.2. Charakterystyki sejsmiczności wydzielonych stref sejsmogenicznych

Na podstawie katalogów sejsmicznych, informacji sejsmologicznych takich, jak mechanizm i parametry źródłowe, oraz na podstawie informacji geologiczno - tektonicznej określa się charakterystyki sejsmiczności w wydzielonych strefach sejsmogenicznych. Wyniki tego etapu analizy hazardu sejsmicznego zależą od przyjętego podejścia, deterministycznego czy probabilistycznego.

### IV.2.2.1. Podejście deterministyczne

Na podstawie wszystkich dostępnych danych dla każdej strefy sejsmogenicznej identyfikuje się zjawisko o potencjalnie największej sile oddziaływania w miejscu lokalizacji projektowanego obiektu, tzw. **Prawdopodobne Maksymalne Historyczne Trzęsienie Ziemi (PMHTZ)**. Najbardziej pesymistyczny scenariusz zakłada, że w strefie wystąpi najsilniejsze możliwe zjawisko sejsmiczne o magnitudzie równej magnitudzie *PMHTZ* podwyższonej o 0.5 w odległości najbliższej lokalizacji obiektu (np. Green, Hall, 1994). Ponieważ wraz ze wzrostem odległości od ogniska, z powodu własności skał następuje tłumienie amplitud fal sejsmicznych, odległość pomiędzy źródłem a punktem odbioru (położeniem obiektu inżynierskiego) ma duże znaczenie dla prawidłowego przeprowadzenia analizy hazardu. Sposób wyznaczania odległości może być dobrany subiektywnie, zależnie od ilości i jakości posiadanych danych. Do najczęstszych należą odległość epicentralna lub hipocentralna (rys. 2), a także odległości od uskoku, czyli najbliższego punktu pęknięcia lub jego rzutu na powierzchni. Aby uzyskane ostateczne wyniki były spójne w dalszych krokach należy zachować konsekwencję i odległość wyznaczać zawsze tak samo.



**Rys. 2.** Przykład najczęstszych definicji odległości źródło-odbiornik.

Wynikiem tego etapu analizy jest mapa stref sejsmogenicznych wraz z oceną maksymalnej magnitudy, jaką dana strefa sejsmogeniczna może emitować, z założeniem, że przyszłe źródło sejsmiczne pojawi się w miejscu zlokalizowanym najbliżej punktu odbioru, czyli obiektu projektowanego.

#### IV.2.2.2. Podejście probabilistyczne

Dla każdej strefy sejsmogenicznej wyznacza się probabilistyczne charakterystyki sejsmiczności, reprezentowane funkcjami gęstości prawdopodobieństwa położenia epicentrum, częstości występowania zdarzeń sejsmicznych i ich wielkości. W stosunku do stref sejsmogenicznych przyjmuje się założenie, że wewnątrz strefy rozkłady prawdopodobieństwa wymienionych parametrów są niezmiennie. Charakterystyki te wyznaczone są z próby, którą tworzy katalog sejsmiczny.

Najczęściej zakłada się, że położenie źródeł sejsmicznych w strefie jest rozkładem równomiernym w epicentrach wstrząsów, o dwuwymiarowej gęstości prawdopodobieństwa (np. Lasocki i Zespół, 2001):

$$f(x, y) = \begin{cases} 1/|S| & \text{dla } (x, y) \in S \\ 0 & \text{dla } (x, y) \notin S \end{cases} \quad (2.2.2.1)$$

gdzie  $S$  oznacza strefę sejsmiczną, a  $|S|$  jest jej polem.

Jako model rozkładu liczby zdarzeń w stałym okresie czasu dla strefy sejsmicznej przyjmuje się rozkład Poissona (np. Lomnitz, 1974), według którego prawdopodobieństwo wystąpienia  $n$  zdarzeń w ciągu  $D$  jednostek czasu dane jest wzorem:

$$\Pr(N = n, D) = \frac{(\lambda D)^n}{n!} e^{-\lambda D} \quad (2.2.2.2)$$

gdzie  $\lambda$  jest parametrem rozkładu.

Rozkład wielkości źródła sejsmicznego estymowany może być w sposób parametryczny, polegający na apriorycznym wyborze funkcji aproksymującej nieznaną funkcję gęstości prawdopodobieństwa, lub w podejściu nieparametrycznym, w którym kształt funkcji gęstości prawdopodobieństwa nie jest założony z góry, a zależy tylko od danych empirycznych (np. Lasocki *i inni*, 2000, 2002; Kijko *i inni*, 2001a, b).

Najczęściej stosowany w PAHS rozkład wielkości zdarzeń sejsmicznych wynika z relacji Gutenberga-Richtera, opisującej empiryczną zależność pomiędzy liczbą występujących trzęsień ziemi, a ich magnitudą. Powyżej określonej wartości progowej,  $M_{min}$ , zdefiniowanej jako próg kompletności katalogu sejsmicznego, logarytm dziesiętny liczby zdarzeń o magnitudzie większej lub równej  $M$ ,  $\log N$ , jest liniowo zależny od wielkości  $M$  (Gutenberg i Richter, 1944):

$$\log N = a - bM, \quad (2.2.2.3)$$

gdzie  $a$  jest parametrem zależnym od aktywności sejsmicznej obszaru, natomiast wartość parametru  $b$  zależy od stosunku ilości dużych zdarzeń sejsmicznych do ilości małych.

Wynikający z tej relacji rozkład magnitudy jest lewostronnie obcięty rozkładem wykładniczym (np. Aki, 1965):

$$f(M) = \begin{cases} 0 & \text{dla } M < M_{min} \\ \beta \exp(-\beta(M - M_{min})) & \text{dla } M \geq M_{min} \end{cases}, \quad (2.2.2.4)$$

gdzie  $f(\bullet)$  oznacza funkcję gęstości prawdopodobieństwa zmiennej losowej, natomiast  $\beta = b \cdot \ln(10)$ .

Zakładając fizyczną górną granicę wielkości źródła, której przekroczenie nie jest możliwe ze względu na ograniczoność potencjalnych możliwości medium (np. Dargahi-Noubary, 1983; Kijko i Sellevoll, 1989, 1992), rozkład magnitudy jest dwustronnie obcięty rozkładem wykładniczym (Hamilton, 1967; Page, 1968; Cosentino *i inni*, 1977):

$$f(M) = \begin{cases} 0 & \text{dla } M < M_{min} \\ \frac{\beta \exp(-\beta(M - M_{min}))}{1 - \exp(-\beta(M_{max} - M_{min}))} & \text{dla } M_{min} \leq M \leq M_{max} \\ 0 & \text{dla } M > M_{max} \end{cases}, \quad (2.2.2.5)$$

gdzie  $M_{max}$  oznacza górne ograniczenie zakresu magnitud.

Wielkość parametru  $\beta$  estymowana jest najczęściej metodą maksymalnej wiarygodności (Aki, 1965). Dla funkcji (2.2.2.4) estymator maksymalnej wiarygodności parametru  $\beta$  zdefiniowany jest jako:

$$\hat{\beta} = \frac{1}{M - M_{min}}, \quad (2.2.2.6)$$

gdzie  $\bar{M} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M_i$  jest średnią magnitud  $M \geq M_{\min}$ .

Jeśli w opisie wielkości źródła zakłada się istnienie górnej granicy zakresu magnitud, to wartość parametru  $\beta$  aproksymowana może być równaniem (Gibowicz i Kijko, 1994):

$$\hat{\beta} = \hat{\beta}_0(1 - \kappa_{\max}), \quad (2.2.2.7)$$

gdzie  $\kappa_{\max} = \hat{\beta}_0 \frac{(M_{\max} - M_{\min}) \exp(-\hat{\beta}_0(M_{\max} - M_{\min}))}{1 - \exp(-\hat{\beta}_0(M_{\max} - M_{\min}))}$ , a  $\hat{\beta}_0$  jest estymatą zdefiniowaną równaniem (2.2.2.6).

Górne ograniczenie wielkości źródła estymowane jest na podstawie zarejestrowanych zjawisk. Jeśli strefa sejsmiczna jest tożsama uskokiowi, maksymalną możliwą magnitudę trzęsienia ziemi można aproksymować w oparciu o dane historyczne i o parametry geometryczne struktury sejsmotektonicznej. Jeśli strefę sejsmogeniczną tworzy sejsmiczność rozproszona, maksymalna magnituda może być oszacowana na podstawie magnitudy największego historycznego trzęsienia ziemi zwiększonej o pół rzędu jednostki magnitud, czyli o 0.5. Możliwe do przyjęcia są również inne przybliżenia potencjalnie najwyższej magnitudy, np. na podstawie statystycznej analizy powtarzalności wstrząsów dla danej struktury (np. Kijko i Funk, 1994; Gibowicz i Kijko, 1994; Pisarenko *i inni*, 1996). Ostatnia zaproponowana metoda oceny  $M_{\max}$  to formuła iteracyjna wprowadzona przez Kijko i Grahama (1998) postaci:

$$\hat{M}_{\max} = M_{\max}^{obs} + \int_{M_{\min}}^{\hat{M}_{\max}} [F(M)]^{\lambda T} dM, \quad (2.2.2.8)$$

gdzie  $M_{\max}^{obs}$  jest magnitudą najsilniejszego wstrząsu zarejestrowanego w strefie,  $\lambda$  oznacza częstość występowania wstrząsów o  $M \geq M_{\min}$ ,  $T$  jest okresem aktywności sejsmicznej.

Jeśli spełnione są założenia o jednorodności, stacjonarności i stochastycznej niezależności procesu to wstrząsy większe od  $M_{\max}$  nigdy nie wystąpią.

### IV.2.3. Wyznaczanie relacji tłumienia drgań gruntu dla badanego rejonu

Wielkość drgań podłoża na powierzchni zależy od charakterystyki źródła, odległości źródła-odbiornik, drogi propagacji fal sejsmicznych, a także od lokalnych warunków geologicznych w miejscu rejestracji sygnału. Efekt sejsmiczny może być opisywany za pomocą różnych parametrów drgań, takich jak wartości szczytowe przyspieszenia (**Peak Ground Acceleration, PGA**), prędkości (**Peak Ground Velocity, PGV**) lub przemieszczenia (**Peak Ground Displacement, PGD**) drgań gruntu oraz za pomocą amplitud spektralnych drgań, czyli wartości spektrów odpowiedzi dla ustalonej częstotliwości drgań własnych oscylatora (np. Boore *i inni*, 1997; Ambraseys i Douglas, 2003; Atkinson i Boore, 2006).

Zależność pomiędzy wybranym parametrem drgań a czynnikami warunkującymi jego wielkość na powierzchni jest opisywana ilościowo zależnością regresyjną pomiędzy

wybrany parametrem drgań podłoża w ustalonym punkcie, a wielkością źródła i odległością epicentralną. Związki te noszą nazwę relacji tłumienia lub predykcyjnych równań drgań podłoża (*PRDP*). Podstawowa forma relacji tłumienia może być zapisana za pomocą związku:

$$\log a(x, y) = \alpha + v(M) + g(R) + \delta(x, y), \quad (2.3.1)$$

gdzie  $a(x, y)$  to parametr drgań w miejscu odbioru  $(x, y)$ ,  $v(M)$  jest funkcją opisującą zależność wielkości drgań od magnitudy,  $g(R)$  to funkcja opisująca zależność wielkości drgań od odległości epicentralnej  $R$ ,  $\delta(x, y)$  jest czynnikiem opisującym lokalny wpływ podłoża w miejscu odbioru na wielkość drgań, czyli tzw. lokalną amplifikację,  $\alpha$  to stała (np. Douglas, 2003).

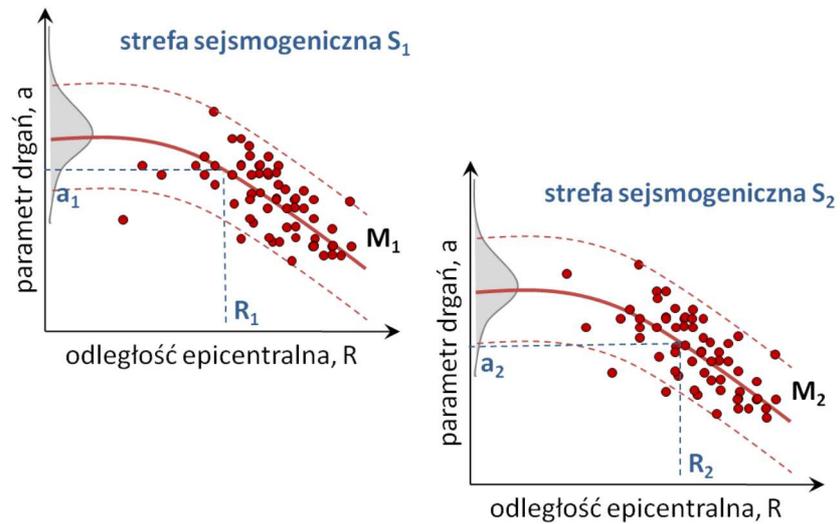
Relacje typu (2.3.1) prognozują dla danych wartości magnitud i odległości epicentralnych medianę wartości  $\log a(x, y)$ . Przedział, w którym można spodziewać się wartości rzeczywistej wybranego parametru drgań z ustalonym prawdopodobieństwem, to przedział ufności dla predykcji.

Do oceny istotności otrzymanego związku wykorzystuje się test Fishera-Snedecora, natomiast istotność poszczególnych parametrów bada się za pomocą testu *t*-Studenta. Weryfikacja jakości modelu odbywa się także poprzez analizę wartości resztowych, czyli różnic pomiędzy obserwacjami zmiennej zależnej a wartościami oszacowanymi na podstawie modelu.

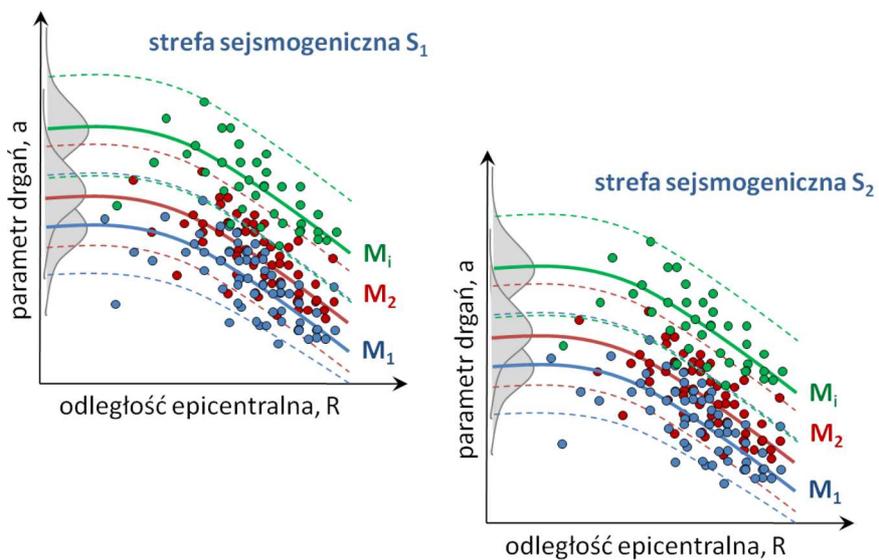
Predykcyjne równania propagacji drgań podłoża są estymowane na podstawie pomiarów sejsmometrycznych. Dla obszaru badań, dla którego nie ma odpowiedniej do analizy regresji bazy pomiarów drgań gruntu, stosuje się relacje opracowane dla innego miejsca. Relacja musi być dobrana w ten sposób, aby reprezentowała zjawiska o odpowiednim mechanizmie ogniskowym oraz odpowiednich parametrach źródła sejsmicznego. Musi również odpowiadać cechom ośrodka geologicznego, dla którego prowadzona jest analiza hazardu sejsmicznego.

Po opracowaniu *PRDP* właściwych dla obszaru badań, estymuje się efekt sejsmiczny w miejscu projektowanego obiektu. W podejściu deterministycznym efekt sejsmiczny szacowany jest dla maksymalnej potencjalnej magnitudy w odpowiedniej odległości epicentralnej dla wszystkich stref sejsmogenicznych. W przypadku podejścia probabilistycznego estymuje się efekt sejsmiczny od wszystkich źródeł sejsmicznych w odpowiednich odległościach epicentralnych dla każdej strefy sejsmogenicznej, rys. 3.

a. Podejście deterministyczne



b. Podejście probabilistyczne



**Rys. 3.** Zamiana charakterystyk sejsmiczności stref sejsmogenicznych, poprzez relacje tłumienia, w charakterystyki parametru drgań dla ustalonego punktu obszaru badań.

W analizie hazardu sejsmicznego dla potrzeb projektowych obiektów budowlanych istotna jest wielkość drgań obiektów w odpowiedzi na drgania podłoża. Odpowiedź na drgania obiektów można przybliżyć za pomocą odpowiedzi oscylatora o jednym stopniu swobody. To pozwala oszacować spektrum odpowiedzi oscylatora, czyli rozkład maksymalnych drgań oscylatora o określonym tłumieniu i częstotliwości własnej drgań w odpowiedzi na wymuszenie kinematyczne w postaci drgań podłoża spowodowanych wstrząsem sejsmicznym. Wyznaczanie przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi dla wybranej składowej drgań podłoża odbywa się w następujący sposób:

- dla zadanego tłumienia, np. 0.05, i częstotliwości drgań własnych, np. z zakresu od 0.1 do 25 Hz, wyznacza się przyspieszenia drgań oscylatorów, pobudzonych wybraną składową akcelerogramu;
- następnie, wyznacza się maksima z bezwzględnej wartości amplitud przyspieszenia drgań poszczególnych oscylatorów.

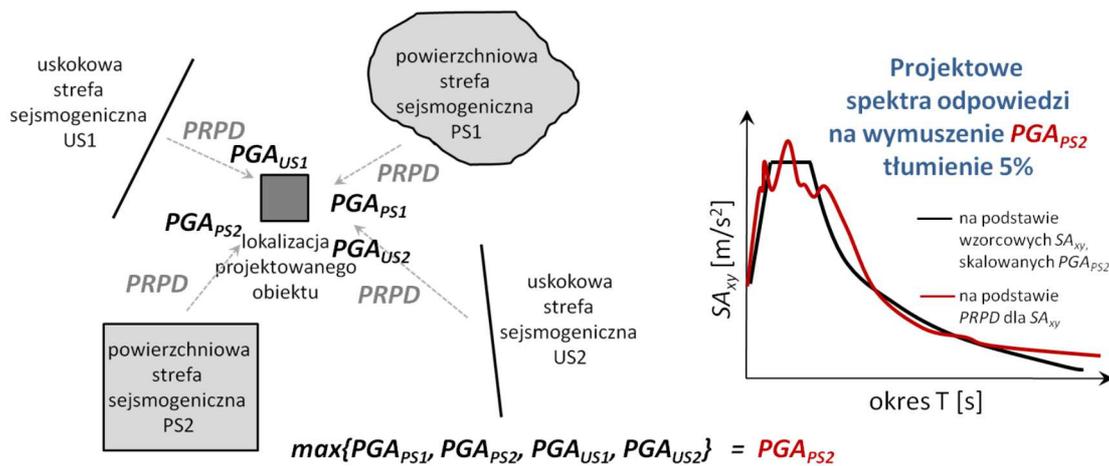
Wartości szczytowe przedstawione w funkcji okresu drgań własnych tworzą spektrum odpowiedzi oscylatora o ustalonym tłumieniu na wymuszenie założonym akcelerogramem. Amplitudy spektralne są jednym z parametrów drgań i dla nich można również wyznaczyć relacje tłumienia typu (2.3.1) (np. Boore i Joyner, 1982; Ambraseys i Douglas, 2003).

#### **IV.2.4. Estymacja krzywych hazardu sejsmicznego**

Końcowym etapem analizy hazardu sejsmicznego jest wyznaczenie tzw. projektowych wartości drgań podłoża, czyli wartości wybranego parametru drgań, które mogą wystąpić w okresie funkcjonowania projektowanego obiektu i które muszą być uwzględnione w projekcie budowy tego obiektu. Wyniki tego etapu analizy również zależą od przyjętego podejścia.

##### **IV.2.4.1. Podejście deterministyczne**

W podejściu deterministycznym projektowe wartości drgań podłoża oszacowane są na podstawie wartości drgań podłoża spowodowanych potencjalnymi maksymalnymi trzęsieniami ziemi w poszczególnych strefach sejsmogenicznych. Jako projektowe wartości szczytowe przyspieszeń drgań gruntu przyjmuje się maksymalne *PGA* spośród wszystkich *PGA* wywołanych modelowanymi trzęsieniami w strefach sejsmogenicznych. Projektowe wartości *PGA* mogą zostać wykorzystane do oszacowania projektowych spektrum odpowiedzi w postaci skalowanych wzorcowych spektrum odpowiedzi. Aby otrzymać projektowe wartości spektrum odpowiedzi w miejscu lokalizacji obiektu można również podstawiać do relacji tłumienia dla spektrum odpowiedzi parametry trzęsienia ziemi, które dały projektowe wartości *PGA* (np. Clough, 1993, Krinitzsky, 1993). Na rys. 4 przedstawiono schemat oszacowania projektowych przyspieszeniowych spektrum odpowiedzi.



**Rys. 4.** Schemat oszacowania projektowych przyspieszeniowych spektrów odpowiedzi w DAHS.

Bardzo silny wpływ na obiekty inżynierskie ma czas trwania drgań cząstek gruntu. Jest to kolejny parametr wyznaczany w procesie deterministycznej analizy hazardu sejsmicznego. Jest to ważne o tyle, że im dłuższa ekspozycja obiektu na drgania tym bardziej prawdopodobne jest powstanie uszkodzeń z tym związanych.

#### IV.2.4.2. Podejście probabilistyczne

W probabilistycznej analizie zagrożenia sejsmicznego źródła sejsmiczne i parametry opisujące propagację fal sejsmicznych są zmiennymi losowymi. Skutkiem tego parametry opisujące drgania gruntu są również zmiennymi losowymi o pewnych rozkładach prawdopodobieństwa. Najczęściej wynikiem PAHS są takie wartości parametrów drgań, których prawdopodobieństwo przekroczenia w przyjętym horyzoncie prognozy jest ustalone i wynosi zazwyczaj 5%, 10% i 50%.

Spodziewany wpływ jednej strefy sejsmicznej w punkcie odbioru o współrzędnych  $(x, y)$  to wynik zsumowanego efektu sejsmicznego wyznaczonego poprzez relację (2.3.1) od wszystkich możliwych odległości epicentralnych wynikających z rozciągłości strefy, opisanych rozkładem  $f(R)$ , i od wszystkich możliwych wielkości źródła w strefie sejsmogenicznej, opisanych rozkładem  $f(M)$ . Prawdopodobieństwo, że wartość szczytowa przyspieszenia drgań gruntu w punkcie odbioru o współrzędnych  $(x, y)$  przekroczy zadaną wartość  $a_{max}$  na skutek aktywności  $k$ -tej strefy sejsmogenicznej w ciągu okresu  $D$  jest dane równaniem (np. Cornell, 1968, McGuire, 1993):

$$\Pr_k(a \geq a_{\max}) = \int_{R_{\min}^{(k)}}^{R_{\max}^{(k)}} \int_{m_{\min}^{(k)}}^{m_{\max}^{(k)}} f_k(R) f_k(M | n \neq 0, D) \Pr(a \geq a_{\max} | M, R) dM dR \quad (2.4.2.1)$$

gdzie:  $f_k(R)$  jest rozkładem odległości epicentralnych w  $k$ -tej strefie sejsmogenicznej,

$R_{\min}^{(k)}, R_{\max}^{(k)}$  to granice zakresu możliwych odległości epicentralnych,

$m_{\min}^{(k)}, m_{\max}^{(k)}$  to dolne i górne ograniczenie wielkości źródła sejsmicznego w  $k$ -tej strefie sejsmogenicznej,

$f_k(M | n \neq 0, D)$  jest rozkładem wielkości źródła w strefie, warunkowym ze względu na wystąpienie wstrząsu w ciągu okresu  $D$ :

$$f_k(M | n \neq 0, D) = \frac{\lambda_k D f_k(M) \exp\{-\lambda_k D [1 - F_k(M)]\}}{1 - \exp(-\lambda_k D)} \quad (2.4.2.2)$$

gdzie:  $\lambda_k$  jest średnią aktywnością w strefie,

$f_k(M)$  i  $F_k(M)$  są odpowiednio funkcjami gęstości prawdopodobieństwa i dystrybuantą wielkości źródła w strefie sejsmogenicznej,

$\Pr(a > a_{\max} | M, R)$  to prawdopodobieństwo przewyższenia wartości szczytowej,  $a_{\max}$ , warunkowe ze względu na pojawienie się wstrząsu o wielkości  $M$  w odległości epicentralnej  $R$ , wynikające z relacji (2.3.1):

$$\Pr(a \geq a_{\max} | M, R) = 1 - F_t(t(a_{\max}, R, M), n - v - 1) \quad (2.4.2.3)$$

gdzie:  $F_t(t, n - v - 1)$  oznacza dystrybuantę rozkładu Studenta o  $(n - v - 1)$  stopniach swobody,  $n$  jest liczbą rejestracji sejsmometrycznych wykorzystanych w estymacji współczynników regresji,  $v$  jest liczbą zmiennych niezależnych regresji, a

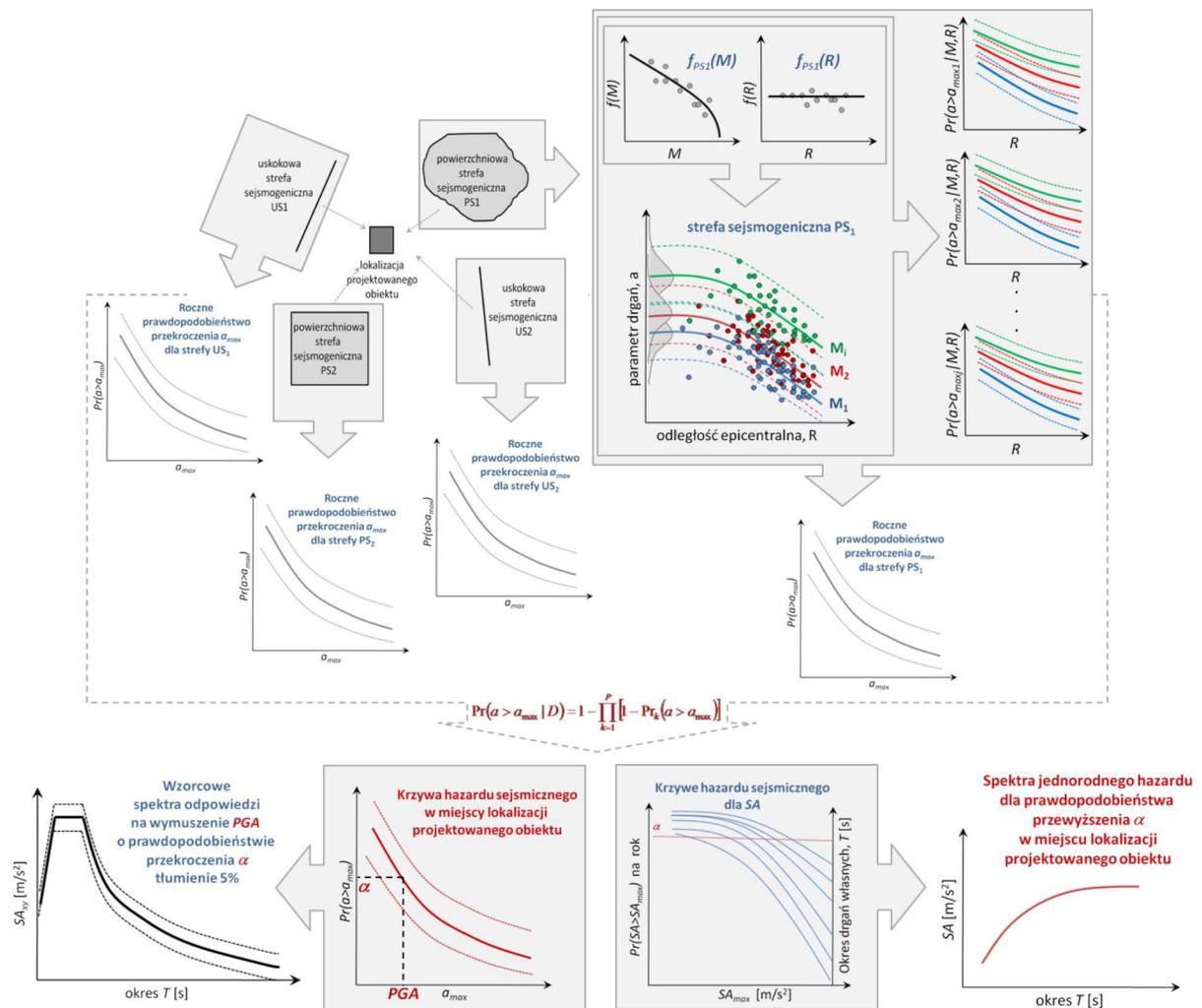
$$t(a_{\max}, R, M) = \frac{\log a_{\max} - E[\log a(x, y)]}{\sigma_{\log a(x, y)}}, \quad (2.4.2.4)$$

gdzie  $E[\log a(x, y)]$  oznacza wartość oczekiwaną zmiennej  $\log a(x, y)$  daną wzorem 2.3.1, natomiast  $\sigma_{\log a(x, y)}$  oznacza błąd zmiennej  $\log a(x, y)$ .

Dla zbioru  $P$  stref, w którym każda ma własne prawdopodobieństwo przewyższenia wartości  $a_{\max}$ ,  $\Pr_k(a \geq a_{\max})$  w okresie  $D$ , całkowite prawdopodobieństwo wystąpienia w okresie prognozy o długości  $D$  drgań o wielkości równej lub większej od  $a_{\max}$  jest zdefiniowane jako:

$$\Pr(a > a_{\max} | D) = 1 - \prod_{k=1}^P [1 - \Pr_k(a > a_{\max})]. \quad (2.4.2.5)$$

Również w podejściu probabilistycznym wartości *PGA* są wykorzystane do oszacowania spektrów odpowiedzi w postaci skalowanych wzorcowych spektrów odpowiedzi (rys. 5, gdzie *a* oznacza przyspieszenia drgań gruntu, *PGA*) lub na podstawie relacji tłumienia spektrów odpowiedzi estymuje się spektra jednorodnego hazardu (**Uniform Hazard Spectra, UHS**), czyli odpowiedź oscylatora dla określonego tłumienia o takim samym prawdopodobieństwie przewyższenia dla poszczególnych częstotliwości drgań własnych (National Research Council, 1988), (rys. 5, gdzie *a* oznacza przyspieszeniowe spektra odpowiedzi, *SA* dla poszczególnych częstotliwości drgań własnych i określonego tłumienia).



**Rys. 5.** Schemat oszacowania wzorcowych przyspieszeniowych spektrów odpowiedzi (*a* oznacza przyspieszenia drgań gruntu, *PGA*) oraz przyspieszeniowych spektrów jednorodnego hazardu (*a* oznacza przyspieszeniowe spektra odpowiedzi, *SA* dla poszczególnych częstotliwości drgań własnych i określonego tłumienia) w PAHS.

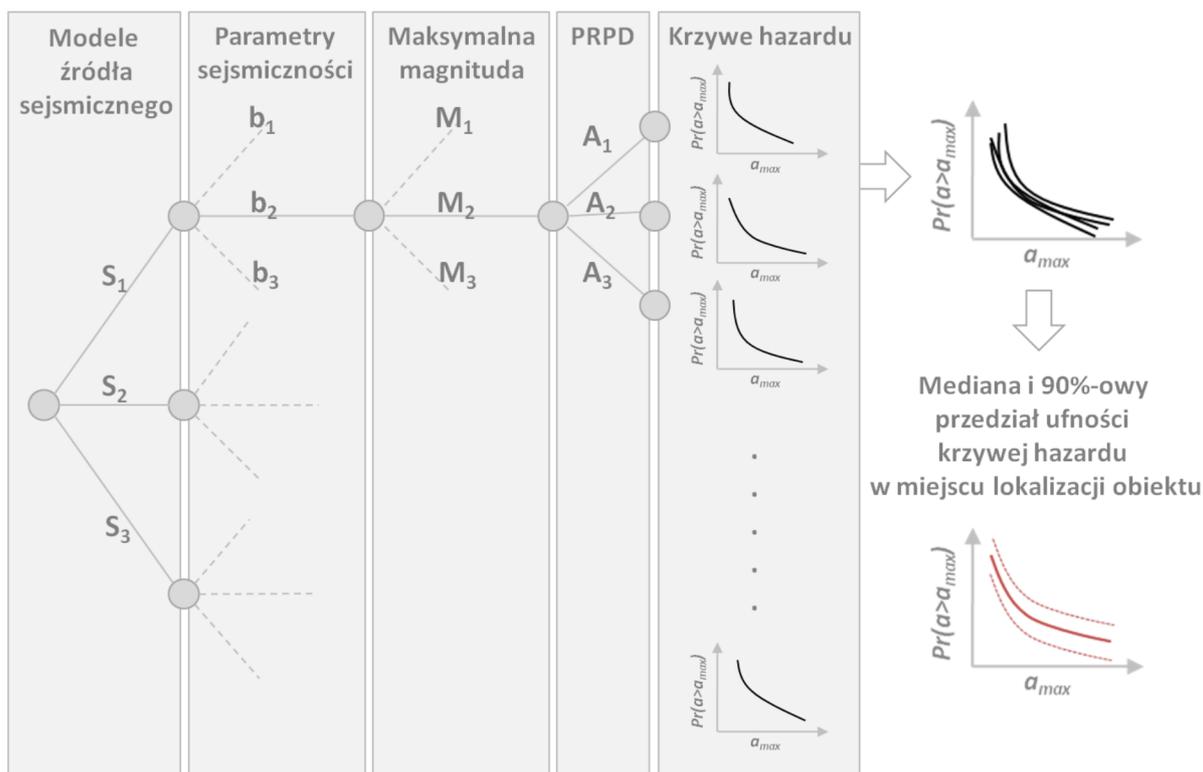
Wszystkie obliczone w procesie analizy hazardu parametry dają informację inżynierską. Informacja ta jest podstawą do projektowania obiektów inżynierskich takich jak budowle, w tym budowle specjalnego przeznaczenia, w zakresie ich odporności na drgania cząstek gruntu o różnej częstotliwości, spowodowane zjawiskiem sejsmicznym.

### IV.3. Ocena niepewności estymacji hazardu sejsmicznego

Estymacja zagrożenia sejsmicznego dostarcza przybliżone a nie rzeczywiste wartości poszukiwanych wielkości. Niepewność estymacji hazardu sejsmicznego jest sumą niepewności pochodzących z dwóch źródeł (np. SSHAC, 1997). Pierwszy rodzaj niepewności, zwany aleatoryczną, wynika z losowego charakteru zmiennej. Niepewność tego typu jest nieodłączną częścią modelu, nawet jeśli model jest właściwy i znane są jego parametry. Drugi typ niepewności, zwany epistemologiczną, to niepewność poznania, związana z fragmentarycznym charakterem wiedzy. W miarę zwiększenia informacji, niepewność epistemologiczna maleje. Oba rodzaje niepewności powinny być rozróżnione i ocenione w kolejnych etapach analizy zagrożenia sejsmicznego. Każdy etap oceny hazardu sejsmicznego powinien zmierzać w kierunku redukcji niepewności. Należy ocenić dokładność i kompletność danych oraz przeprowadzić końcową ocenę błędów wyników.

Niepewność aleatoryczna oceniana jest najczęściej poprzez funkcje prawdopodobieństwa w PAHS. Relacja (2.4.2.1) uwzględnia wszystkie rodzaje niepewności aleatorycznej w zadaniu prognozy wielkości drgań. Niepewność położenia źródła względem punktu odbioru reprezentowana jest przez  $f_k(R)$ , niepewność wystąpienia źródła o danej wielkości przez  $f_k(M|n \neq 0, D)$ , natomiast niepewność wielkości drgań przy danym źródle o danym położeniu względem punktu odbioru przez  $Pr(a > a_{max}|M, R)$ .

Aby zmniejszyć niepewność epistemologiczną możemy korzystać z alternatywnych modeli przebiegu procesu powstawania wstrząsów i alternatywnych możliwości tłumienia drgań. Alternatywy analizy hazardu zestawia się w tzw. drzewo logiczne (np. Cornell i Merz, 1975; Coppersmith i Youngs, 1986). Drzewo logiczne jest schematem decyzyjnym składającym się z gałęzi i węzłów, reprezentujących pewien wybór z przypisanym prawdopodobieństwem stopnia zaufania eksperta do wyboru. Suma prawdopodobieństw wszystkich gałęzi spotykających się w jednym węźle jest równa 1.0. Jest to wygodna forma uwzględnienia wag przypisanych do różnych parametrów zarówno w PAHS, jak i w DAHS (rys. 6).



**Rys. 6.** Przykład schematu drzewa logicznego wykorzystywanego do prezentacji niepewności epistemologicznej w analizie hazardu sejsmicznego. Każda z gałęzi reprezentuje pewien wybór z przypisanym prawdopodobieństwem stopnia zaufania eksperta do wyboru. Suma prawdopodobieństw wszystkich gałęzi spotykających się w jednym węźle jest równa 1.0 (na podstawie National Research Council, 1988).

#### IV.4. Ocena hazardu sejsmicznego w warunkach występowania sejsmiczności indukowanej

Sejsmiczność indukowana jest niekorzystną, dynamiczną odpowiedzią ośrodka skalnego na technologiczną aktywność człowieka, naruszającą stan równowagi tego ośrodka. Wstrząsy indukowane towarzyszą pracom górniczym w podziemnych i odkrywkowych kopalniach, eksploatacji złóż ropy i gazu, napełnianiu powierzchniowych zbiorników wodnych, pozyskiwaniu energii geotermalnej, podziemnemu magazynowaniu cieczy i gazów. Silne zjawiska sejsmiczne towarzyszące działalności człowieka odpowiadają umiarkowanym trzęsieniom ziemi. Stanowią zagrożenie dla ludzi, dla obiektów i urządzeń technicznych oraz dla infrastruktury urbanistycznej.

Indukowany proces sejsmiczny jest zjawiskiem złożonym, zależnym od zmienności w czasie warunków generowania wstrząsów oraz różnorodności czynników antropogenicznych mających wpływ na ten proces. Jego analiza wymaga również studiowania poszczególnych procesów technologicznych, które destabilizują górotwór. Z tego względu do oceny i prognozy zagrożenia sejsmicznością antropogeniczną należy zastosować odpowiednia

metodę uwzględniającą złożoność indukowanego procesu sejsmicznego oraz wywołujący go proces technologiczny.

Najczęściej występującym rodzajem sejsmiczności antropogenicznej w Polsce jest sejsmiczność indukowana działalnością górniczą. Dla polskich obszarów górniczych istnieje obszerna baza danych sejsmicznych oraz instrumentalnych danych sejsmometrycznych. Dla tego typu sejsmiczności indukowanej do oceny zagrożenia sejsmicznego należy zastosować **Zmodyfikowany Schemat Probabilistycznej Analizy Hazardu Sejsmicznego (ZPAHS)** uwzględniający specyfikę sejsmiczności indukowanej działalnością górniczą. Schemat ten został opracowany i szczegółowo opisany w pionierskich pracach Lasockiego (2002, 2005, 2009), Lasockiego i Orleckiej-Sikory (2002) oraz Lasockiego i innych (2000a,b; 2001; 2002).

Dla pozostałych typów sejsmiczności antropogenicznej ocena zagrożenia sejsmicznego nie ma pełnego specjalnie dedykowanego rozwiązania. Należy przyjąć, że jeśli proces sejsmiczny jest zmienny w czasie i istnieje wystarczająco obszerna baza danych sejsmologicznych, sposób szacowania zagrożenia sejsmicznego może być taki, jak w przypadku sejsmiczności indukowanej działalnością górniczą. Jeśli proces sejsmiczny jest stacjonarny, do analizy zagrożenia sejsmicznego można wykorzystać metody stosowane dla sejsmiczności naturalnej z uwzględnieniem czasu aktywności sejsmicznej. W przypadku niewystarczającej bazy danych sejsmologicznych do oceny zagrożenia sejsmicznego należy zastosować podejście deterministyczne.

W każdym przypadku należy sprawdzić, czy w momencie szacowania zagrożenia spowodowanego sejsmicznością antropogeniczną pojawiło się w literaturze opracowanie metodyki oceny hazardu sejsmicznego dla któregośkolwiek typu sejsmiczności antropogenicznej. Stale rozwijana międzynarodowa współpraca naukowa na polu sejsmiczności indukowanej działalnością człowieka oraz współpraca z ośrodkami przemysłowymi, dostarczającymi wiedzę o procesach technologicznych odpowiedzialnych za pojawienie się sejsmiczności indukowanej, daje szansę na rozwój metodyki oceny hazardu sejsmicznego w tym obszarze.

#### **IV.4.1. Proces sejsmiczny zmienny w czasie. Sejsmiczność indukowana działalnością górniczą**

Mechanizm generujący wstrząsy na terenach górniczych, w przeciwieństwie do sejsmiczności naturalnej, jest zmienny w czasie. Sejsmiczność na terenach górniczych pojawia się w odpowiedzi na wywołane eksploatacją zmiany pola naprężeń. Zmienne w czasie wpływy prac górniczych na pole naprężeń w górotworze powodują, że proces generowania zjawisk sejsmicznych jest niestacjonarny. Powstawanie zjawisk sejsmicznych w kopalniach jest zdeterminowane lokalizacją i postępem frontu eksploatacyjnego. Konsekwencją tego jest ograniczony czas istnienia stref sejsmicznych i zmienne w czasie wartości parametrów opisujących powstałe strefy. Strefy sejsmiczne na obszarach górniczych mają charakter przejściowy, czasoprzestrzenny.

Drugą istotną cechą sejsmiczności indukowanej jest to, że składa się ona z co najmniej dwóch różnych rodzajów wstrząsów: indukowanych i wyzwalanych (np. Lasocki, 2008). To powoduje, że magnitudy wstrząsów górniczych nie spełniają prawa Gutenberga-Richtera.

Obie te własności zostały uwzględnione w ZPAHS, która dla sejsmiczności indukowanej pracami eksploatacyjnymi jest prognozą odnoszącą się do konkretnego okresu w przyszłości. Schemat postępowania w ZPAHS jest następujący:

1. należy wydzielić na badanym obszarze strefy sejsmogeniczne aktywne obecnie i w przeszłości, a następnie określić ich położenie i czas aktywności;
2. należy wyznaczyć probabilistyczne charakterystyki sejsmiczności stref aktywnych obecnie i w przeszłości;
3. należy wykonać prognozę położenia i czasu aktywności stref aktywnych w przyszłości dla okresu objętego wnioskowaniem;
4. należy wykonać prognozę probabilistycznych charakterystyk sejsmiczności stref przyszłych dla okresu objętego analizą;
6. należy wyznaczyć lokalne relacje tłumienia drgań dla badanego rejonu, czyli tzw. Predykcyjne Równania Drgań Podłoża, PRDP;
7. należy transformować prognozowane probabilistyczne charakterystyki sejsmiczności stref przyszłych, poprzez PRDP, w probabilistyczne charakterystyki parametru drgań w ustalonym horyzoncie prognozy.

#### **IV.4.1.1. Wydzielanie stref sejsmogenicznych aktywnych obecnie oraz w przeszłości**

Zmodyfikowana Probabilistyczna Analiza Hazardu Sejsmicznego, tak jak klasyczna PAHS, wymaga identyfikacji źródeł sejsmicznych generujących wstrząsy sejsmiczne i ich modelu. W procesie zbierania i analizy danych potrzebnych do przeprowadzenia tego etapu analizy należy stosować się do wskazań opisanych w części 2 niniejszego opracowania (Metodyka ocen prawdopodobieństwa wystąpienia wstrząsów sejsmicznych i ocena zagrożenia sejsmicznego, część 2, rozdział 1.1). Dla każdej zidentyfikowanej strefy sejsmicznej należy dodatkowo oszacować czas jej aktywności sejsmicznej.

#### **IV.4.1.2. Wyznaczenie probabilistycznych charakterystyk sejsmiczności stref aktywnych obecnie i w przeszłości**

Charakterystyki probabilistyczne stref sejsmogenicznych aktywnych obecnie i w przeszłości wyznacza się po to, by na ich podstawie, poprzez odpowiednią ekstrapolację, prognozować charakterystyki dla stref, których aktywność spodziewana jest w przyszłości. Na tym etapie analizy należy stosować się do wskazań opisanych powyżej w rozdz. IV.2.2.2 .

- a. W stosunku do stref sejsmicznych należy przyjąć założenie, że wewnątrz strefy rozkłady prawdopodobieństwa parametrów sejsmiczności: położenia epicentrum, częstości występowania zdarzeń i wielkości zdarzeń, są niezmienne. W czasoprzestrzennych strefach sejsmiczności indukowanej niezmiennosc dotyczy całego okresu aktywności strefy.
- b. W przypadku oceny rozkładu wielkości źródła sejsmicznego, jeśli ilość zjawisk w strefie sejsmogenicznej przekracza 50, należy zastosować bezmodelowy, nieparametryczny estymator gęstości prawdopodobieństwa i dystrybuanty magnitudy/logarytmu energii (np. Kijko i in., 2001; Lasocki, 2005; Orlecka-Sikora i Lasocki, 2005).
- c. Dla każdej strefy sejsmogenicznej należy oszacować maksymalną wielkość (energię, magnitudę) wstrząsu spodziewaną w ciągu przyszłych D jednostek czasu.

- d. W wyniku tej części analizy każda strefa aktywna w przeszłości i obecnie zostaje opisana:
- położeniem określonym poprzez rozkład epicentrow wstrząsów zlokalizowanych oraz okresem aktywności strefy;
  - średnią liczbą zdarzeń na jednostkę czasu;
  - wartością optymalnego parametru gładkości  $h$ , wartością górnego ograniczenia wielkości wstrząsów w strefie, liczbą wstrząsów powyżej progu kompletności, wielkościami zdarzeń powyżej progu kompletności oraz wagami jądra adaptacyjnego, jeśli do szacowania rozkładu wielkości źródła sejsmicznego wykorzystano adaptacyjną formę bezmodelowego jądrowego estymatora rozkładu magnitudy/logarytmu energii.

#### **IV.4.1.3. Prognoza położenia i czasu aktywności stref aktywnych w przyszłości**

Położenie i czas aktywności przyszłych stref sejsmogenicznych wiąże się z miejscami i okresem przyszłej eksploatacji. Prognozę tych wielkości dokonuje się na podstawie planu prac górniczych w badanym rejonie.

- a. Należy założyć, że prognozowana strefa będzie aktywna w okresie równym czasowi eksploatacji rejonu wyodrębnionego w planach górniczych, powiększonemu o pół roku.
- b. Rozciągłość strefy przyjmuje się jako równą rozciągłości eksploatowanego rejonu plus margines 200 m z każdej strony (np. Cichy, Lasocki 1982, Drzęzła i in. 1991).

#### **IV.4.1.4. Prognoza probabilistycznych charakterystyk sejsmiczności stref przyszłych dla okresu objętego analizą**

- a. Należy założyć, że rozkład probabilistyczny położenia epicentrum wewnątrz strefy sejsmogenicznej jest rozkładem równomiernym o dwuwymiarowej gęstości prawdopodobieństwa.
- b. Z uwagi na ograniczony czas aktywności strefy sejsmogenicznej, zazwyczaj krótki w porównaniu z horyzontem prognozy dla obiektów jądrowych, sugeruje się dodatkowo oparcie analizy hazardu sejsmicznego na maksymalnej wielkości wstrząsu spodziewanej w ciągu przyszłych  $D$  jednostek czasu oprócz standardowo przyjmowanej maksymalnej wielkości (magnitudy/energii) wstrząsu.
- c. Wartości maksymalnej wielkości wstrząsu oraz maksymalnej wielkości wstrząsu spodziewanej w ciągu przyszłych  $D$  jednostek czasu w przyszłej strefie należy oszacować na podstawie wartości tych parametrów, uzyskanych dla stref aktywnych obecnie i w przeszłości. W tym celu należy założyć, że:
  - przyszłe strefy sejsmogeniczne będą powtarzać probabilistyczne rozkłady parametrów sejsmiczności najbliższych w przestrzeni i czasie stref sejsmogenicznych aktywnych obecnie i w przeszłości.
  - jeśli nowa prognozowana strefa znajduje się w sąsiedztwie kilku stref aktywnych obecnie lub w przeszłości, własności strefy przyszłej prognozuje się na podstawie ważonych własności wszystkich stref sąsiadujących. Wagi można ustalić przyjmując, że stopień podobieństwa charakterystyk sejsmiczności jest odwrotnie proporcjonalny do odległości pomiędzy strefą przyszłą, a strefą przeszłą.

- jeśli spodziewane miejsce pojawienia się nowej strefy znajduje się daleko od miejsc lokalizacji stref aktywnych obecnie lub przeszłych, charakterystyki sejsmiczności strefy przyszłej wyznacza się z map powierzchniowego rozkładu charakterystyk sejsmiczności całego obszaru aktywnego. Mapy takie tworzy się na podstawie posiadanych informacji o wszystkich przeszłych i obecnie aktywnych strefach sejsmogenicznych.
- d. W wyniku tego etapu analizy każda strefa sejsmiczna, której wystąpienia należy spodziewać się w przyszłości powinna być opisana:
- położeniem, określonym rozkładem węzłów siatki, związanym z lokalizacją planowanych prac górniczych,
  - okresem aktywności strefy, określonym na podstawie planowanych prac eksploatacyjnych,
  - prognozowaną maksymalną wielkością (magnitudą/energiją) wstrząsu spodziewaną w ciągu oczekiwanego przyszłego okresu aktywności strefy T,
  - prognozowaną wartością górnego ograniczenia zakresu magnitudy/energii wstrząsów w strefie.
- e. W celu zwiększenia wiarygodności prognoz przyszłej aktywności sejsmicznej, wyznaczone charakterystyki powinny zostać poddane ocenie eksperckiej, mającej na celu ewentualną korektę prognoz na podstawie wiedzy na temat możliwych zmian procesu generowania wstrząsów wywołanych planowanymi sposobami eksploatacji.

#### **IV.4.1.5. Wyznaczenie Predykcyjnych Równań Drgań Podłoża**

W tym etapie analizy należy stosować się do wskazań opisanych w rozdz. II.

#### **IV.4.1.6. Prognoza probabilistycznych charakterystyk parametrów drgań**

Funkcyjne charakterystyki rozkładu wielkości źródła w przyszłych strefach należy interpolować na podstawie nieparametrycznych estymatorów wyznaczonych dla stref przeszłych.

W tym etapie analizy należy stosować się do wskazań opisanych powyżej w rozdz. IV.2.2.2.

#### **IV.4.2. Ocena niepewności analizy**

W tym etapie analizy należy stosować się do wskazań opisanych powyżej w rozdz. IV.3

#### **IV.4.3. Interpretacja wyników oceny hazardu sejsmicznego dla celów projektowych**

Na podstawie prognozowanego jednego lub kilku sterujących wstrząsów indukowanych działalnością górniczą należy estymować projektowe przyspieszeniowe spektra odpowiedzi fundamentów obiektów jądrowych dla składowej poziomej i pionowej dla ustalonych okresów drgań dla referencyjnego prawdopodobieństwa przekroczenia.

## V. SŁOWNIK WYBRANYCH POJĘĆ

**GPS** - *Global Positioning System*, system nawigacji satelitarnej.

**Grawimetria** - nieinwazyjna, powierzchniowa metoda geofizyczna, w której przedmiotem pomiaru jest pionowa składowa siły ciężkości.

**Geotomografia sejsmiczna** - badania masywu skalnego polegające na prześwietlaniu górotworu za pomocą fal sejsmicznych. Geotomografia pasywna polega na wykorzystaniu fal generowanych podczas naturalnych wstrząsów sejsmicznych, geotomografia aktywna wykorzystuje fale wzbudzone przez człowieka.

**Magnetyka** - nieinwazyjna, powierzchniowa metoda geofizyczna, w której przedmiotem pomiaru jest natężenie ziemskiego pola magnetycznego.

**Metody geoelektryczne** - metody pomiarów geofizycznych oparte na detekcji skał i innych obiektów znajdujących się pod powierzchnią gruntu charakteryzujących się właściwościami elektrycznymi odmiennymi od właściwości ich otoczenia. Metody geoelektryczne oparte są na zróżnicowaniu jednego z trzech następujących parametrów: oporu właściwego, przenikalności elektrycznej i przenikalności magnetycznej.

**Płytkie wysokorozdzielcze sejsmiczne pomiary refleksyjne w wariancie 2D/3C** - badania dwuwymiarowe z zastosowaniem odbiorników trójskładowych, tj. odbiorników (geofonów bądź hydrofonów) mierzących wszystkie trzy, wzajemnie prostopadłe składowe fali sejsmicznej. Tego typu pomiary pozwalają na precyzyjne określenie typu fali sejsmicznej oraz kierunku jej propagacji.

**Pomiary georadarem GPR** – *Ground Penetrating Radar*, badanie polegające na generowaniu fali elektromagnetycznej i wysyłaniu jej w badany ośrodek gruntowy, skalny bądź materiałowy. Fala, przechodząc przez ośrodek, ulega załamaniu, odbiciu na występujących w ośrodku granicach, natomiast napotykając na obiekty, infrastrukturę lub inne niejednorodności ulega rozproszeniu.

**Pomiary sejsmiczne w wariancie 2D** – badanie polegające na rejestrowaniu fal sejsmicznych wzbudzonych w określonym miejscu wzdłuż jednego kierunku.

**Pomiary sejsmiczne w wariancie 3D** – badanie polegające na rejestrowaniu fal sejsmicznych na określonym obszarze.

**Pomiary sejsmiczne refleksyjne w wariancie 3D/3C** - badania trójwymiarowe z zastosowaniem odbiorników trójukładowych, tj. odbiorników (geofonów bądź hydrofonów) mierzących wszystkie trzy, wzajemnie prostopadłe składowe fali sejsmicznej. Tego typu

pomiary pozwalają na precyzyjne określenie typu fali sejsmicznej oraz kierunku jej propagacji.

**Półszczegółowe pomiary grawimetryczne** - pomiary o gęstości pomiaru lokującej się pomiędzy pomiarami regionalnymi (2-4 punkty pomiarowe / km<sup>2</sup>), a pomiarami szczegółowymi (> 12 punktów pomiarowych / km<sup>2</sup>); obszar Polski pokryty jest półszczegółowym zdjęciem grawimetrycznym o średniej odległości pomiędzy punktami pomiarowymi rzędu 550 m. Informacje o dostępnych danych grawimetrycznych można uzyskać z Centralnej Bazy Danych Geofizycznych (<http://geoportal.pgi.gov.pl/cbdg/dane/geofizyka>) działającej w obrębie Państwowego Instytutu Geologicznego - Państwowego Instytutu Badawczego.

**Półszczegółowe pomiary magnetyczne** - pomiary o gęstości pomiaru lokującej się pomiędzy pomiarami regionalnymi (2-4 punkty pomiarowe / km<sup>2</sup>) a pomiarami szczegółowymi (> 12 punktów pomiarowych / km<sup>2</sup>). Informacje o dostępnych danych magnetycznych można uzyskać z Centralnej Bazy Danych Geofizycznych (<http://geoportal.pgi.gov.pl/cbdg/dane/geofizyka>) działającej w obrębie Państwowego Instytutu Geologicznego - Państwowego Instytutu Badawczego.

**Półszczegółowe pomiary geoelektryczne** - stosowane głównie do pomiarów magnetotellurycznych charakteryzujące się gęstością punktów pomiarowych rzędu 500 – 1000 m wzdłuż profilu pomiarowego

**Projekt GIS** – *Geographic Information System*, system informacji geograficznej służący do gromadzenia, przetwarzania oraz wizualizacji danych geograficznych.

**Sejsmika refrakcyjna** – badanie polegające na sztucznym wzbudzaniu fal sejsmicznych i pomiarze prędkości rozchodzenia się fal refrakcyjnych w ośrodku skalnym. Fala refrakcyjna powstaje na granicy dwóch ośrodków skalnych o różnej prędkości rozchodzenia się w nich fal.

**Sejsmika refleksyjna** – badania polegające na sztucznym wzbudzaniu fal sejsmicznych od granic warstw i podziemnych struktur geologicznych.

**Wysokoczęstotliwościowe pomiary magnetotelluryczne:** metody elektromagnetyczne oparte o naturalne pola elektromagnetyczne i wykorzystujące fale elektromagnetyczne o częstotliwościach 1Hz – 20000Hz

**VSP** – *Vertical Seismic Profiling*, pionowe profilowania sejsmiczne, również w wersji offsetowej: otworowe pomiary sejsmiczne, charakteryzujące się tym, iż źródło fali sejsmicznej znajduje się na powierzchni ziemi natomiast odbiornik znajduje się w otworze wiertniczym. W przypadku pomiarów zero-offsetowych źródło fali sejsmicznej ulokowane jest

w pobliżu otworu natomiast w przypadku pomiarów offsetowych źródło ulokowane jest w pewnym (czasem zmiennym w trakcie pomiarów oddaleniu od otworu).

## VI. LITERATURA

- Aki, K. (1965) Maximum likelihood estimate of  $b$  in the formula  $\log N = a - bM$  and its confidence limits. *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, 43, 237-239.
- Ambraseys, N.N., Douglas, J. (2003) Near-field horizontal to vertical earthquake ground motion, *Soil Dyn. Eng Earth. Eng.* 23, 1-8.
- Atkinson, G.M., Boore, D.M. (2006) Earthquake ground-motion prediction equation for eastern North America, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 96, 2181-2205.
- Boore, D.M., Joyner, W.B. (1982) The empirical prediction of ground motion, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 72, S43-S60.
- Boore, D.M., Joyner, W.B., Fumal, T.E. (1997) Estimation of response spectra and peak acceleration from western North American earthquakes: A summary of recent work, *Seismol. Res. Lett.* 68(1), 128-153.
- Cichy A., Lasocki S. (1982) Możliwości statystycznego opracowywania kopalnianych danych mikrosejsmologicznych pod kątem oceny stanu zagrożenia tąpnięciami. *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci. M-5* (155), 85-100.
- Clough, R.W., Penzien, J. (1993) *Dynamics of Structures*, Second Edition, McGraw-Hill, Inc., New York.
- Coppersmith, K.J., Youngs, R.R. (1986) Capturing uncertainty in probabilistic seismic hazard assessment within intraplates tectonic environments. *Proc 3rd U.S. Natl. Conf. Earthquake Engineering*, Charleston, 301-312.
- Cornell, C.A. (1968) Engineering seismic risk analysis. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 58, 1583-1606.
- Cornell, C.A., Merz, H.A. (1975) Seismic Risk Analysis of Boston. *Journal of the Structural Engineering Division*, ASCE 101, 2027-2043.
- Cosentino, P., Ficara, V., Luzio, D. (1977) Truncated exponential frequency-magnitude relationship in the earthquake statistics. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 67, 1615-1623.
- Dargahi-Noubary, G.R. (1983) A procedure for estimation of the upper bound for earthquake magnitudes. *Phys. Earth Planet. Int.*, 33, 91-93.
- Douglas, J. (2003) Earthquake ground motion estimation using strong-motion records: a review of equations for the estimation of peak ground acceleration and response spectra, *Earth-Science Reviews* 61, 43-104.

- Drzęźła B., Białek J., Jaworski A., Bańka P., Słapa W. (1991) Rozkłady ilości i energii wstrząsów górniczych w sąsiedztwie czynnych wyrobisk Ścianowych. *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci. M-15 (235)*, 197-202.
- Gibowicz, S.J., Kijko, A. (1994) *An Introduction to Mining Seismology*. Academic Press, San Diego.
- Green RA, Hall WJ. (1994) *An overview of selected seismic hazard analysis methodologies*, A report on a research project sponsored by the Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Grünthal, G. and the GSHAP Region 3 Working Group (1999) Seismic hazard Assessment for Central, North and Northwest Europe: GSHAP Region 3, *Annali di Geofisica*, vol. 42, N. 6, 999-1011.
- Grünthal, G., Wahlström, R. (2003) An Mw based earthquake catalogue for central, northern and northwest Europe using a hierarchy of magnitude conversions, *Journal of Seismology*, 7, Number 4, 507-531, DOI: 10.1023/B:JOSE.0000005715.87363.13.
- Gutenberg, B., Richter, C.F. (1944) Frequency of earthquakes in California. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 57, 747-760.
- Hamilton, R.M. (1967) Mean magnitude of an earthquake sequence. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 57, 1115-1126.
- Kijko, A., Funk, C.W. (1994) The assessment of seismic hazard in mines. *J. South Afr. Inst. Min. Metall.*, 179-185.
- Kijko, A., Graham, G. (1998) Parametric-historic procedure for probabilistic seismic hazard analysis. Part I: Estimation of maximum regional magnitude  $m_{max}$ . *Pure Appl. Geophys.*, 152, 413-442.
- Kijko A., Sellevoll M.A. (1989) Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files, Part I, Utilization of extreme and complete catalogues with different threshold magnitudes. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 79, 645-654.
- Kijko A., Sellevoll M.A. (1992) Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files, Part II, Incorporation of magnitude heterogeneity. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 82, 120-134
- Kijko, A., Lasocki, S. and Graham, G. (2001a) Nonparametric seismic hazard analysis in mines. *Pure Appl. Geophys.*, 158, 1655-1676.
- Kijko, A., Lasocki, S., Graham, G., Retief S.J.P. (2001b) Non-parametric seismic hazard analysis in mines. In *5<sup>th</sup> Int. Symp. Rockbursts and Seismicity in Mines "Dynamic rock mass response to mining"*, Magalisberg, 17-20 September 2001 (eds. G. van Aswegen, R.J. Durrheim, W.D. Ortlepp) SAIMM S27, Johannesburg, South Africa, 493-500.
- Kijko, A., Lasocki, S., Graham, G. (2001) Nonparametric seismic hazard analysis in mines. *Pure Appl. Geophys.* 158, 1655-1676.

- Krinitzky, E.L., Gould, J.P., Edinger, P.H. (1993) *Fundamentals of Earthquake Resistant Construction*, *Wiley Series of Practical construction Guides*, John Wiley and Sons, Inc., New York, NY, 1993.
- Lasocki, S. (2002) Sposób wykonania prognozy wpływów dynamicznych indukowanych działalnością górnictwem na powierzchnię terenu w rejonie składowiska Żelazny Most, Zakład Hydrotechniczny KGHM Polska Miedź S.A. (niepublikowane)
- Lasocki, S. (2005) Probabilistic Analysis of Seismic Hazard Poses by Mining Induced Events. The Sixth International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines "Controlling Seismic Risk" Proceedings (Y. Potvin, M. Hudyma, eds.) ACG, Perth, pp. 151-156.
- Lasocki S. (2008) Some unique statistical properties of the seismic process in mines. In: Potvin Y, editor. Proceedings of the 1st Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symp., Vol. 1: Mining and Civil. Nedlands, Western Australia: Australian Centre for Geomechanics, p. 667-678.
- Lasocki, S. (2009) Probabilistic Seismic Hazard Analysis For Mining-Induced Seismicity. In: Controlling Seismic Hazard and Sustainable Development of Deep Mines, C. Tang (Ed.): Proc. Seventh Int. Symp. on Rockburst and Seismicity in Mines 21-23 August 2009, Dalian, China, Rinton Press, New York, 59-72.
- Lasocki, S., Orlecka-Sikora B. (2002b) Prognoza drgań gruntu na terenie miasta Polkowice dla okresu 2001-2013. Mat. XXV Zimowej Szkoły Mech. Gór. „Geotechnika i Budownictwo Specjalne 2002”, (D. Flisiak, red.), Wyd. Katedry Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH, Kraków, 369-384.
- Lasocki, S. i inni (2000a) Opracowanie prognozy aktywności sejsmicznej do końca działalności górnictwa KGHM „Polska Miedź” S.A. w Lubinie pod kątem bezpieczeństwa stawu osadowego Żelazny Most i jego rozbudowy, Zarząd Gminy Polkowice (niepublikowane)
- Lasocki, S. i inni (2000b) Opracowanie prognozy drgań gruntu w rejonie stawu osadowego Żelazny Most od aktywności sejsmicznej indukowanej działalnością górnictwem KGHM „Polska Miedź” S.A. w Lubinie w kontekście rozbudowy stawu osadowego Żelazny Most do rzędnej +180 m n.p.m. i 200 m n.p.m., Zarząd Gminy Polkowice (niepublikowane)
- Lasocki, S. i inni (2001) Prognoza aktywności sejsmicznej indukowanej działalnością górnictwem KGHM "Polska Miedź" S.A. w Lubinie wraz z prognozą drgań gruntu dla miasta Polkowice w okresie do końca 2013 roku, Zarząd Gminy Polkowice (niepublikowane)
- Lasocki S. i inni (2002) Aktualizacja prognozy aktywności sejsmicznej indukowanej działalnością górnictwem KGHM „Polska Miedź” S.A. w Lubinie wraz z prognozą drgań gruntu dla miasta Polkowice w okresie do końca 2013 roku, Zarząd Gminy Polkowice (niepublikowane)
- Lasocki, S., Kijko, A. Graham, G. (2000) Model-free seismic hazard estimation. *Proc. Int. Conf. Earthquake Hazard and Risk in the Mediterranean Region, EHRMR'99* (Gokcekus H. ed.) Educational Foundation of Near East University, Lefkosa, T. R. N. Cyprus, 503-508.

- Lasocki, S., Kijko, A., Graham, G. (2002) Model-free seismic hazard analysis. *Seismogenic Process Monitoring*. (Ogasawara, H., Yanagidani, T. and Ando, M., eds). Balkema, Lisse, 327-339.
- Lasocki S. i inni (2001) *Prognoza aktywności sejsmicznej indukowanej działalnością górnictwem KGHM "Polska Miedź" S.A. w Lubinie wraz z prognozą drgań gruntu dla miasta Polkowice w okresie do końca 2013 roku*, Zarząd Gminy Polkowice (niepublikowane).
- Lomnitz, C. (1974) *Global Tectonics and Earthquake Risk*, Elsevier, Amsterdam.
- McGuire, R.K. (1993) Computations of seismic hazard. *Annali di Geofisica*, 36, 181-200.
- McGuire, R.K. (2001) Deterministic vs. probabilistic earthquake hazards and risks. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 21, 5, 377-384.
- Nation Research Council (1988) *Probabilistic Seismic Hazard Analysis. Panel on Seismic Hazard Analysis*, Committee on Seismology, Board on Earth Sciences, Commission on Physical Sciences, Mathematics, and Resources. National Academy Press, Washington, 1988.
- Orlecka-Sikora, B., Lasocki, S. (2005) Nonparametric characterization of mining induced seismic sources. The Sixth International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines "Controlling Seismic Risk" Proceedings (Y. Potvin, M. Hudyma, eds.) ACG, Perth, pp. 555-560.
- Page, R. (1968) Aftershocks and microaftershocks. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 58, 1131-1168.
- Pisarenko, V.F., Lyubushin, A.A., Lysenko, V.B., Golubieva, T.V. (1996) Statistical estimation of seismic hazard parameters: Maximum possible magnitude and related parameters. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, 691-700.
- Reiter, L. (1991) *Earthquake Hazard Analysis*. Columbia University Press, New York.
- Shedlock, K.M., Giardini, D., Gruenthal, G., Zhang, P. (2000) The GSHAP global seismic hazard map. *Seism. Res. Lett.*, 71, 679-686, DOI: 10.1785/gssrl.71.6.679.
- Shenk V., Schenková Z., Kottbauer P., Guterch B., Labák P. (2000) Earthquake Hazard for the Czech Republic, Poland and Slovakia- Contribution to the ILC/IASPEI Global Seismic Hazard Assessment Program, *Natural Hazards*, 21, 2-3, 331-345, DOI: 10.1023/A:1008110506690.
- SSHAC (Senior Seismic Hazard Analysis Committee). Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on Uncertainty and Use of Experts, *US Nuclear Regulatory Commission report CR-6372*, Washington DC.

Zasoby internetowe:

<http://geoportal.pgi.gov.pl>



