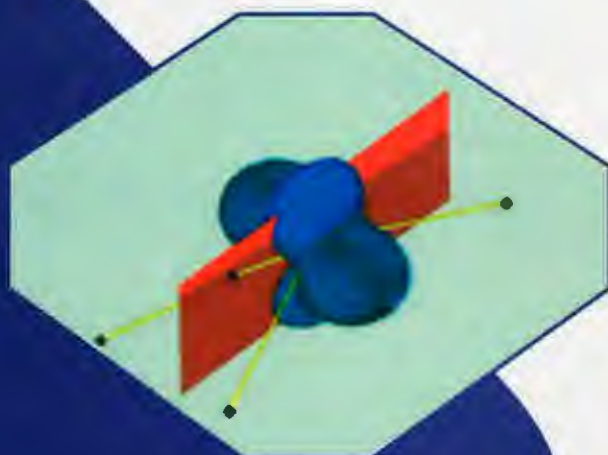


Józef DUBIŃSKI, Krystyna STEC, Adam LURKA

**ODDZIAŁYWANIE WSTRZĄSÓW SEJSMICZNYCH
NA POWIERZCHNIĘ W ZALEŻNOŚCI OD ICH
PARAMETRÓW FIZYCZNYCH**



**GŁÓWNY INSTYTUT GÓRNICHTWA
KATOWICE 2005**

Józef DUBIŃSKI, Krystyna STEC, Adam LURKA

**Oddziaływanie wstrząsów sejsmicznych
na powierzchnię w zależności od ich
parametrów fizycznych**



GŁÓWNY INSTYTUT GÓRNICTWA
Katowice 2005

Rada Programowa ds. Wydawnictw: *prof. dr hab. inż. Jakub Siemek (przewodniczący), prof. dr hab. inż. Tadeusz Chmielniak, prof. dr hab. inż. Bernard Drzęźła, prof. dr hab. inż. Józef Dubiński, prof. dr hab. inż. Joanna Pinińska, prof. dr hab. inż. Korneliusz Miksch, prof. dr hab. inż. Janusz Roszkowski, prof. dr hab. inż. Antoni Tajduś, prof. dr hab. inż. Janusz W. Wandrasz, prof. dr hab. inż. Piotr Wolański*

Komitet Kwalifikacyjno-Opiniodawczy: *prof. dr hab. inż. Antoni Kidybiński (przewodniczący), doc. dr hab. inż. Krystyna Czaplicka, doc. dr hab. inż. Józef Kabiesz, prof. dr hab. inż. Władysław Konopko, prof. dr hab. inż. Jerzy Kwiatek, prof. dr hab. Kazimierz Lebecki, prof. dr hab. inż. Adam Lipowczan, doc. dr hab. inż. Krzysztof Stańczyk, doc. dr hab. inż. Marian Turek, doc. dr hab. inż. Jan Wachowicz*

Recenzent

prof. dr hab. inż. Bernard Drzęźła

Redakcja wydawnicza
Ewa Gliwa

Redakcja techniczna i korekta
Barbara Jarosz
Małgorzata Kuśmirek-Zegadło

Skład, łamanie
Krzysztof Gralikowski

Publikacja jest wynikiem realizacji projektu badawczego nr 5 T12A 057 24 pt.
Analiza wpływu parametrów fizycznych ognisk wstrząsów górniczych
na rozkład oddziaływań sejsmicznych na powierzchni,
finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Informatyzacji

ISBN 83-87610-82-8

Printed in Poland

WSZELKIE PRAWA ZASTRZEŻONE

Katowice, GIG 2005. Wyd. 1. Nakład 100 egz. Ark. wyd. 6,5. Format B5.
Przygotowanie do druku: Zespół Wydawnictw i Usług Poligraficznych
Głównego Instytutu Górniczego
Druk i oprawa: Zakład Poligraficzny „Węglogryf”, Katowice

Pamięci Profesora Bernarda Drzeźli
Autorzy

Spis treści

Wprowadzenie	5
1. Charakterystyka geologiczna rejonów badawczych	7
1.1. Górnośląskie Zagłębie Węglowe (GZW).....	7
1.2. Legnicko-Głogowski Okręg Miedziowy (LGOM)	11
2. Badania sejsmiczne	16
2.1. Metoda analizy fal powierzchniowych MASW	16
2.2. Wyniki pomiarów sejsmicznych.....	19
3. Pomiary sejsmometryczne	30
3.1. Pomiary sejsmometryczne w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym	30
3.2. Pomiary sejsmometryczne w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym	51
4. Relacja między parametrami źródła sejsmicznego a intensywnością oddziaływań sejsmicznych na powierzchni	74
4.1. Dane ogólne	74
4.2. Wyniki obliczeń parametrów źródła	78
5. Mechanizm ognisk wstrząsów	89
5.1. Ogólna charakterystyka metody tensora momentu sejsmicznego.....	89
5.2. Wyniki analizy mechanizmu ognisk wstrząsów w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym.....	91
5.3. Wyniki analizy mechanizmu ognisk wstrząsów w Legnicko- -Głogowskim Okręgu Miedziowym	98
6. Analiza kierunkowości radiacji fal sejsmicznych	104
6.1. Zarys metody	104
6.2. Radiacja fal sejsmicznych w obszarze epicentralnym wstrząsów zaistniałych w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym i Legnicko- -Głogowskim Okręgu Miedziowym	107
Podsumowanie	130
Literatura	132

Wprowadzenie

Generowanie zjawisk sejsmicznych w wyniku działalności górniczej stwarza nadal poważne problemy techniczne, a także społeczne. Szczególnie wysoko-energetyczne wstrząsy górnicze powodują silne ich odczuwanie przez mieszkańców na powierzchni, co jest często bezpośrednią przyczyną dyskomfortu psychicznego. W wielu przypadkach mogą być one także przyczyną powstawania uszkodzeń w obiektach budowlanych zarówno użyteczności publicznej, jak i prywatnych, a także w infrastrukturze technicznej.

Z tych względów bardziej dokładna ocena i prognoza oddziaływań sejsmicznych na powierzchnię jest wciąż aktualna, a badania są podejmowane w celu zarówno bardziej dokładnego poznania mechanizmu samego zjawiska oddziaływania drgań wywoływanych przez wstrząs górniczy na powierzchnię, jak i takie projektowanie eksploatacji górniczej, aby łagodzić wpływy sejsmiczne.

W badaniach wykonanych w ramach projektu badawczego własnego, skoncentrowano się na nowych aspektach zjawiska, które mogą mieć wpływ na rozkład i intensywność oddziaływań sejsmicznych na powierzchni oraz na ich opisie jakościowym i ilościowym. Powszechnie bowiem stosowane zależności empiryczne między parametrem przyspieszenia drgań gruntu na powierzchni – będącym miarą intensywności drgań – a wielkościami określanymi standardowo przez kopalniane sieci sejsmologiczne – to jest energią sejsmiczną wstrząsu i jego lokalizacją (najczęściej ograniczoną do epicentrum), a tym samym odległością „epicentrum wstrząsu – analizowany obiekt” – nie zawsze odznaczają się dużym współczynnikiem korelacji. Fakt ten jednoznacznie świadczy o istnieniu, poza wymienionymi czynnikami, także innych, które mają również pewien, często istotny, wpływ na mierzony na powierzchni efekt sejsmiczny.

W wyniku wcześniejszych badań prowadzonych w Głównym Instytucie Górniczym (Mutke i Dworak 1992, Dubiński i Mutke 1997, Stec i inni 2001) stwierdzono, że jednym ze zjawisk, które powodują powstawanie anomalii efektu sejsmicznego, pochodzącego od wstrząsów górniczych na powierzchni, jest amplifikacja drgań przez przypowierzchniową warstwę gruntu. Opracowana została metoda wyznaczania wartości współczynnika amplifikacji W_f oraz sporządzania map jego rozkładu w funkcji dominującej częstotliwości drgań wymuszających. Niniejszy projekt badawczy przyczynia się do poszerzania możliwości metodycznych w zakresie określania wartości współczynnika W_f przez wprowadzenie nowej sejsmicznej techniki pomiarowej z wykorzystaniem metody wielokanałowej analizy fal powierzchniowych MASW (Park i inni 1999a). Jednak w tym projekcie badawczym skoncentrowano się na dwóch grupach czynników mogących oddziaływać na wielkość powierzchniowego efektu sejsmicznego wstrząsów górniczych, a mianowicie na:

- fizycznych parametrach opisujących ognisko wstrząsu górniczego,
- typie mechanizmu ogniska wstrząsu determinującym kierunkowość radiacji sejsmicznej.

Opracowaną metodę obliczeń i analizy zastosowano dla dwóch rejonów badawczych, a więc dla grupy kopalń węgla kamiennego prowadzących działalność górnictwem w sąsiedztwie aktywnego sejsmicznie uskoku Kłodnickiego (kopalnie: „Bielszowice”, „Halemba”, „Polska-Wirek” i „Śląsk”) oraz kopalń rud miedzi (ZG „Rudna” – najbardziej aktywna sejsmicznie w tym rejonie).

Uzyskane wyniki potwierdzają istotność przyjętej tezy badawczej, że parametry fizyczne ognisk wstrząsów, a przede wszystkim kierunkowość radiacji sejsmicznej ognisk, mają istotny wpływ na kształtowanie się rozkładu intensywności oddziaływań sejsmicznych na powierzchni, mierzonej wartością parametru przyspieszenia drgań.

1. Charakterystyka geologiczna rejonów badawczych

1.1. Górnośląskie Zagłębie Węglowe (GZW)

Obszar GZW budują różnowiekowe utwory geologiczne. Wierceniami zostały rozpoznane utwory karbonu górnego oraz osady triasu, trzeciorzędu i czwartorzędu. Ponadto, utwory karbońskie są dobrze rozpoznane robotami górniczymi. Ogólna charakterystyka geologiczna w odniesieniu do prowadzonych badań obejmowała karbon produktywny oraz jego nadkład – trias, trzeciorząd i czwartorzęd, a więc te utwory, które decydują o tworzeniu się ognisk wstrząsów górniczych oraz o transmisji fal sejsmicznych na drodze od ogniska wstrząsu do punktu na powierzchni ziemi. Na omawianym obszarze karbon produktywny stanowią warstwy orzeskie, rudzkie i siodłowe.

Warstwy orzeskie – to kompleks utworów grubości od około 320 do 500 m, zbudowany z iłowców i piaskowców z pokładami węgla. W profilu tych warstw zdecydowanie przeważają szare, miejscami piaszczyste iłowce, których w stosunku do piaskowców jest od 2 do 8 razy więcej. Tworzą one warstwy o różnej grubości od kilkudziesięciu centymetrów do 15–40 m. Piaskowce natomiast stanowią ławice grubości od około 2 do 30 m. Są to na ogół piaskowce drobnoziarniste, rzadziej średnio- lub gruboziarniste, barwy szarej. Piaskowce w ławicach grubości powyżej 10 m stanowią od 41 do 76% ogólnej ilości piaskowców występujących w warstwach orzeskich tego rejonu. Leżą one w dolnej części profilu omawianych warstw, generalnie poniżej pokładu 330.

Warstwy rudzkie – stanowią serię osadów grubości od około 230 do 350 m. Są one wyraźnie dwudzielne. Charakteryzują się stosunkowo małą zawartością piaskowców w górnej części profilu, która zdecydowanie wzrasta w jego części dolnej. Stosunek piaskowców do iłowców w części górnej tych warstw wynosi 0,4, natomiast w dolnej 2–4. Podobnie jak w warstwach orzeskich, piaskowce są drobnoziarniste rzadko różnoziarniste, mało porowate, charakteryzujące się wysokimi parametrami wytrzymałościowymi w granicach od około 13,7 do 47,5 MPa. Stanowią one ławice grubości od około 2 do 70 m. Udział piaskowców w ławicach grubości powyżej 10 m wynosi od 44 do 90%. Przeważająca ich ilość zalega poniżej pokładu 407. Warstwy te są potencjalnym miejscem powstawania ognisk wstrząsów.

Warstwy siodłowe – jest to kompleks warstw o zmiennej grubości od około 20 do 53 m. Tworzy go seria osadów złożona głównie z pokładów węgla, w otoczeniu których występują w różnych ilościach piaskowce i iłowce. Stosunek piaskowców do iłowców wskazuje, że ich ilość w profilu jest zbliżona. Iłowce występują na ogół bezpośrednio w otoczeniu pokładów węgla lub w postaci przewarstwień wśród piaskowców. Piaskowce są na ogół drobnoziarniste, zbite i nieporowate. Wśród nich występują ławy piaskowców średnio- i gruboziarnistych, miejscami nawet zlepieńców. Charakteryzują się one bardzo wysokimi parametrami wytrzymałościowymi ($R_c \approx 60,5\text{--}192$ MPa). Stanowią ławice o grubościach od około 10 do 27 m. Ławice cienkie są rzadkością, na co wskazuje udział piaskowców gruboławicowych w profilu tych warstw, wahający się w granicach od 90 do 100%. Warstwy siodłowe to najbardziej potencjalne miejsca tworzenia się ognisk wstrząsów wysokoenergetycznych.

Trias w GZW jest stosunkowo szeroko rozprzestrzeniony, głównie w północnej i wschodniej jego części. Przeważają utwory retu i wapienia muszlowego wykształcone w postaci kompleksu wapienno-dolomitycznego o miąższości do 140 m; mniejsze znaczenie mają ilasto-piaszczyste osady niższego pstrego piaskowca oraz ily i iłowce kajpru.

Trzeciorząd (miocen) występuje na znacznych obszarach zagłębia w formie ciągłej pokrywy osadowej leżącej bezpośrednio na utworach karbońskich. Strop karbonu pod tą pokrywą jest silnie zróżnicowany morfologicznie, szczególnie w części południowej. W miocenie zagłębia wydziela się kilka, często nieprecyzyjnie określonych, formacji litostratygraficznych. Do najstarszych utworów w południowej części zagłębia zalicza się piaskowce i czarne iłolupki, wypełniające dna najgłębszych dolin erozyjnych, określane jako helwet, oraz ciemnoszare iłowce formacji zebrzydowickiej o miąższości do 130 m. W centrum i na zachodzie zagłębia za najstarsze uważa się lądowe osady klastyczne formacji kłodnickiej. Osady te występują w formie izolowanych płatów wypełniających głównie zagłębienia bezodpływowe; ich miąższość przeważnie nie przekracza kilkudziesięciu metrów. W południowej części zagłębia głębokie rynny erozyjne są wypełnione też przez młodsze osady formacji dębowieckiej wykształconej w części dolnej jako spływy grawitacyjne fliszu karpackiego (olistostromy) – ogniwo zamarskie, a w części wyższej – w postaci, typowych dla tej formacji, osadów grubookruchowych. Największa miąższość formacji dębowieckiej wynosi 440 m, na ogół rzadko jednak przekracza 100 m; stratygraficznie formacja ta jest zaliczana do badenu. Na utworach formacji dębowieckiej, kłodnickiej lub bezpośrednio na karbonie leżą morskie osady ilasto-mułowcowe formacji skawińskiej mającej największy zasięg lateralny. Miąższość osadów tej formacji jest silnie zróżnicowana, generalnie wzrasta w kierunku południowym, gdzie maksymalnie osiąga około 1100 m. Utwory te są zaliczane do badenu. Z młodszych utworów miocenu (głównie w zachodniej części GZW) jest znany kompleks utworów ewaporatowych, gipsy i sole kamienne o miąższości do 150 m, określane jako odpowiednik formacji wielickiej i leżący nad nimi zwarty kompleks osadów ilasto-mułowcowych o miąższości do 300 m określane jako warstwy gliwickie.

Czwartorzęd jest rozwinięty w formie pokrywy osadowej zbudowanej z piasków i żwirów przewarstwianych glinami i iłami. Ich miąższość jest zróżnicowana, przeważnie w granicach 10–40 m, w dolinach rzek może osiągać około 100 m. W części północnej zagłębia osady czwartorzędu często leżą bezpośrednio na karbonie. Utwory czwartorzędowe mają istotne znaczenie dla odbioru drgań na powierzchni, gdyż właśnie one kształtują wielkość i rozkład współczynnika amplifikacji drgań.

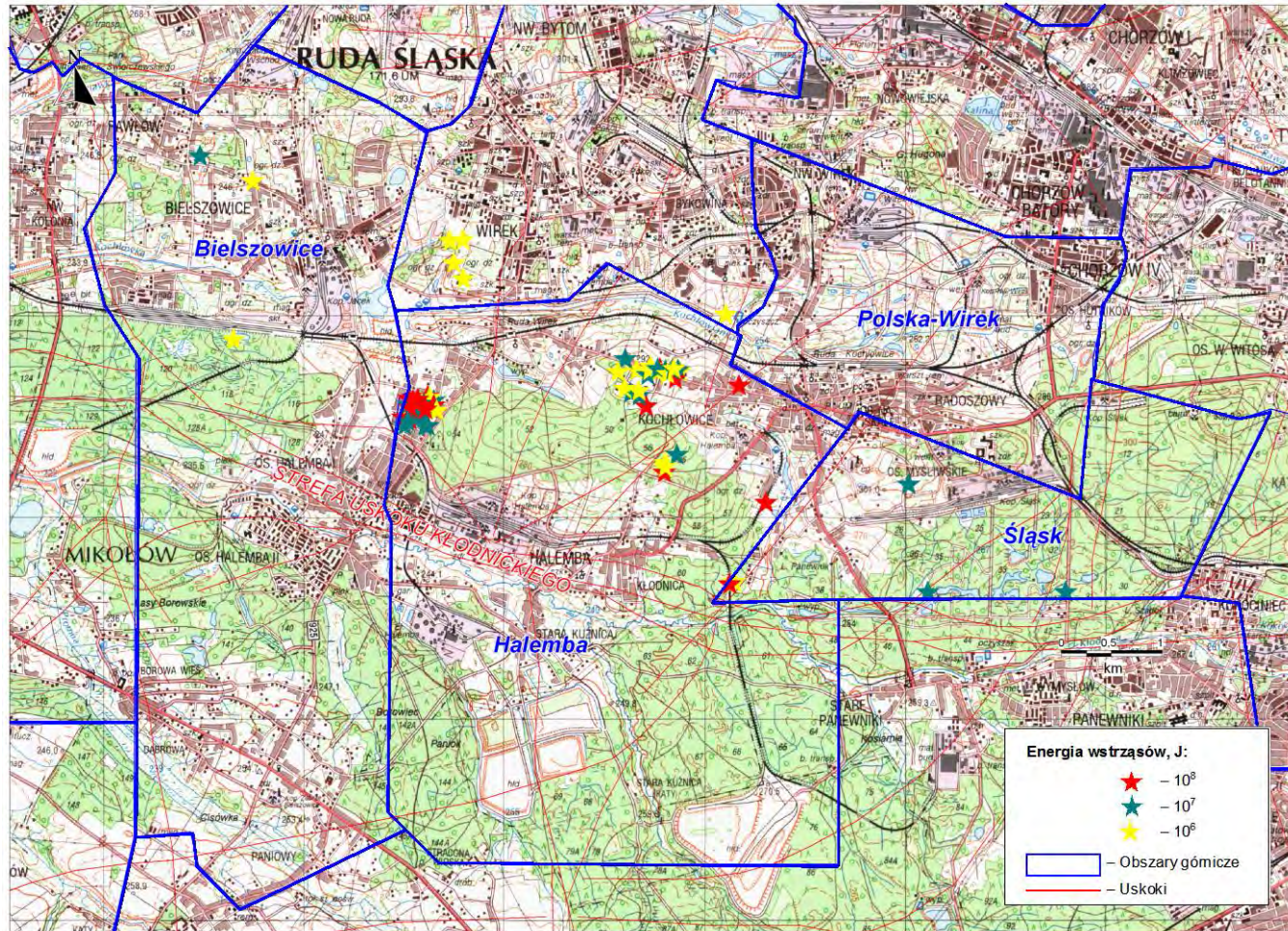
Górnośląskie Zagłębie Węglowe powstało w czasie waryscyjskiej epoki tektonicznej jako zapadlisko przedgórskie wypełnione molasowymi utworami karbonu; zapadlisko to zostało rozwinięte na bloku prekambryjskim zwanym masywem górnośląskim. Skutkiem działalności orogenezy waryscyjskiej było powstanie w zagłębiu dwóch stref tektonicznych: strefy tektoniki fałdowej i strefy tektoniki dysjunktywnej. Strefa tektoniki fałdowej biegnie wąskim pasem wzdłuż zachodniej granicy zagłębia. Dla strefy tej charakterystyczne jest występowanie zaburzeń nieciągłych w formie nasunięć. Nasunięcia mają południkowy przebieg, generalnie równoległy do granic zagłębia.

Obszar objęty badaniami leży w południowym skrzydle siodła głównego będącego strukturą o bardzo skomplikowanej budowie. Stanowi je szereg, ułożonych w ciąg, elewacji i kopuł o zgodnych osiach, oddzielonych elewacjami lub podobnymi do nich strukturami poprzecznymi o osiach przesuniętych. Dodatkowo struktury te przecina szereg uskoku normalnych i odwróconych, często o charakterze kulisowym. Większość dużych uskoku tnących siodło główne jest wieku waryscyjskiego. Niektóre z nich zostały odmłodzone w okresie późniejszym, tzn. w mezozoiku i trzeciorzędzie. Na badanym obszarze można wydzielić trzy systemy uskoku, tzn.: równoleżnikowy, południkowy i subrównoleżnikowy NE-SW.

Uskokiem o przebiegu równoleżnikowym, prawdopodobnie o warescyjskim pochodzeniu i odnowionym w miocenie jest uskok kłodnicki. Charakteryzuje się on zmienną amplitudą zrzutów i zmiennym kątem nachylenia płaszczyzny uskoku. Uskok ten zrzuca warstwy generalnie na południe. Amplituda zrzutu wynosi od 360 m w jego wschodniej części i maleje w kierunku zachodnim do około 20 m. W rejonie badań amplituda ta wynosiła około 100 m. Uskokowi kłodnickiemu towarzyszy szereg mniejszych uskoku, o zrzutach od kilku do kilkunastu metrów, układających się schodkowo lub wachlarzowato oraz uskoki II rzędu o zrzutach od kilkunastu do kilkudziesięciu metrów. Występują ponadto deformacje nieciągłe o niedużych długościach do 150 m – tzw. uskoki „opierające”. Uskoki towarzyszące mają różne azymuty, podobnie jak amplitudy zrzutu. Szczeliny uskoku kłodnickiego, a także uskoku towarzyszących wypełnia druzgot skał w postaci brekcji piaskowców, łowców i substancji węglistej oraz bloków piaskowca. Sieć różnokierunkowych uskoku niższych rzędów, towarzyszących uskokowi kłodnickiemu powoduje, że badany obszar został pocięty na szereg bloków tektonicznych o różnej wielkości, przemieszczonych względem siebie zarówno w pionie, jak i w poziomie. Generalnie można stwierdzić, że jest to obszar bardzo podatny na wszelkiego rodzaju deformacje wynikające z przeszłej i obecnie prowadzonej eksploatacji pokładów węgla.

Drugi system uskoku w omawianym obszarze ma przebieg południkowy. Ich cechą charakterystyczną jest to, że w strefach łączenia się z innymi uskoki często się rozszczepiają na szereg mniejszych uskoku. Wielkość ich zrzutów jest zmienna i waha się w granicach od 5 do 120 m, a warstwy górotworu są zrzucane w kierunku na W lub E. Podobnie jest zróżnicowany kąt nachylenia płaszczyzn tych uskoku wynoszący od 40 do 90° oraz szerokość ich stref zmieniająca się z północy na południe.

W trzecim systemie uskoku subrównoleżnikowych o kierunku NE-SW warstwy są zrzucane na NW lub SE w granicach od 0 do 30 m. Są to uskoki dość strome o kątach nachylenia płaszczyzn od 20 do 70°. Do tego systemu uskoku w rejonie badań należy część uskoku III oraz uskok IV. Uskok III ma zmienny kierunek przebiegu i charakteryzuje się amplitudami zrzutu wzrastającymi z północy na południe w granicach od 5 do 30 m. Uskok zrzuca warstwy na SE. Podobnie zmienny jest kąt nachylenia jego płaszczyzny, który waha się od bardzo płaskiego do stromego, tzn. od około 20 do 70°. Uskok IV jest stromym uskoki o upadzie około 70°, ale w rejonie badań ma małą amplitudę zrzutu wynoszącą około 8 m. Rejon badań wraz ze strukturami tektonicznymi w GZW przedstawiono na rysunku 1.1.



Rys. 1.1. Górnśląskie Zagłębie Węglowe – rejon badań ze strukturami tektonicznymi i położeniem ognisk silnych wstrząsów

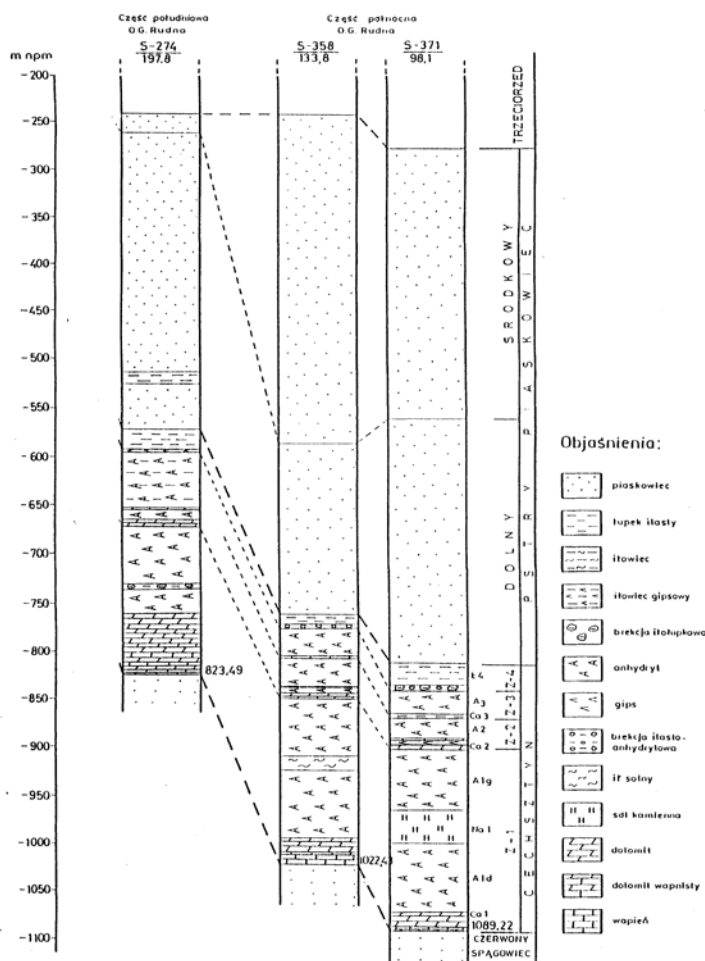
1.2. Legnicko-Głogowski Okręg Miedziowy (LGOM)

Obszar LGOM leży w południowej części monokliny przedsudeckiej, od południa granicząc z blokiem przedsudeckim. Aktywność tektoniczna tej strefy sprzyjała różnicowaniu sedymentacji cechsztyńskiej, późniejszym etapom przebudowy blokowej kompleksu osadowego monokliny oraz sedymentacji i deformacji osadów kenozoicznych.

Utwory skalne omawianego obszaru dzielą się na trzy kompleksy (od najstarszego):

- kompleks skał krystalicznych wieku proterozoicznego oraz skał starszego paleozoiku stanowiących podłoże monokliny,
- kompleks skał osadowych permu – mezozoiku budujących monoklinę,
- kompleks osadów kenozoicznych stanowiący luźny nadkład monokliny.

Powyższe kompleksy zalegają na sobie dyskordantnie i są przedzielone długimi lukami stratygraficznymi. Przykład budowy geologicznej skał w rejonie ZG „Rudna” przedstawiono na rysunku 1.2.



Rys. 1.2. Przykład budowy geologicznej masywu skalnego w rejonie ZG „Rudna”

Na rysunku tym zaznaczono cztery podstawowe warstwy różniące się parametrami fizyko-mechanicznymi i sprężystymi ośrodka skalnego. Należą do nich: czerwony spągowiec, warstwa anhydrytu z dolomitom, pstry piaskowiec oraz trzeciorzęd z czwartorzędem.

W części północnej ZG „Rudna”, na złożu rudy miedzi zalega blisko 250-metrowy kompleks skał dolomitowo-anhydrytowych, obejmujący na głębokości około 1100 m pokład soli o miąższości około 17 m. Kompleks ten charakteryzuje się dużą twardością oraz sprężystością postaciową i objętościową utworów, które bardzo dobrze przewodzą energię sprężystą. Średnia gęstość tych skał wynosi $2,7 \text{ g/cm}^3$, twardość akustyczna około $16 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$, natomiast średnia prędkość fali podłużnej dla tego kompleksu ma wartość około 5800 m/s. Kompleks ten ma zasadnicze znaczenie z uwagi na powstawanie ognisk wysokoenergetycznych zjawisk sejsmicznych.

Bezpośrednio na skałach dolomitowo-anhydrytowych znajduje się warstwa iłowcowa grubości blisko 25 m, nad którą zalegają słabo zróżnicowane piaskowce pstrego piaskowca o łącznej miąższości 560 m. Gęstość tych utworów wynosi $2,2 \text{ g/cm}^3$, a prędkość fali podłużnej blisko 3600 m/s. Sejsmicznie jest to ośrodek tłumiący o niedużej twardości akustycznej rzędu $6 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$.

Trzecie ogniwo stratygraficzne stanowią zalegające na pstrym piaskowcu utwory trzecio- i czwartorzędowe o małej gęstości i stosunkowo małej prędkości fali podłużnej wynoszącej około 1600 m/s. Utwory te cechuje duże tłumienie fal oraz nieduża twardość akustyczna rzędu $2 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$. Miąższość osadów trzeciorzędowych na obszarach górniczych kopalń miedzi wykazuje duże zróżnicowanie. Maksymalne miąższości wynoszą 440–490 m i są udokumentowane w części południowej obszaru złożowego, gdzie są związane z lokalnymi zagłębieniami powstałymi w wyniku działalności krasowej w cechsztyńskiej serii anhydrytowo-węglanowej. Miąższości osadów trzeciorzędowych w granicach 360–480 m stwierdzone w obrębie Wzgórz Dalkowskich są wynikiem intensywnych zaburzeń glacitektonicznych, jakim uległy stropowe partie tych utworów. Miąższość osadów trzeciorzędowych w rejonie badań obejmującym obszar górniczy ZG „Rudna” wynosi od 300 m w rejonie NW, do 350–360 m w rejonie składowiska „Żelazny Most” i 400–440 m w rejonie południowym (wysoczyzna Wzgórz Dalkowskich).

Miąższość osadów czwartorzędowych wykazuje również duże zróżnicowanie od 10 do 100 m. Najmniejsze miąższości, poniżej 10 m, występują w rejonie zaburzeń glacitektonicznych wysoczyzny Wzgórz Dalkowskich, tj. na północy, w pasie przebiegającym przez miejscowości Gwizdanów i Komornki oraz dalej po Guzice i Trzebcz; na zachodzie w rejonie Polkowic oraz na wschodzie w rejonie miejscowości Damówka. Na pozostałej części obszaru górniczego miąższości osadów czwartorzędowych mieszczą się w granicach od 50 do 70 m. Jedynie w wąskich strefach dolinnych oraz związanych z kopalnymi strukturami erozyjnymi na kierunku „równoleżnikowym” (między wioskami Moskorzyn i Żuków) lub NNE-SSW (rejon wsi Tarnówek) udokumentowano większe miąższości – do 100 m. Rozkład wskaźnika udziału osadów piaszczystych w odniesieniu do sumarycznej miąższości utworów czwartorzędowych dla obszaru górniczego „Rudna” wykazuje, że najmniejsze jego

wartości w granicach 0,3–0,5 stwierdza się na rozległym terenie między miejscowościami Moskorzyn, Guzice i Trzebcz. Na północ od tego terenu wartość wskaźnika wzrasta aż do wartości maksymalnej powyżej 0,9 w rejonie Tarnówka. Na tym obszarze okres czwartorzędowy zaznaczył się złożonymi procesami erozji, sedymentacji i deformacji w środowisku lodowcowym, wodnolodowcowym, rzeczny i w niewielkim stopniu bagiennym oraz płytkich zbiorników wodnych. W związku z tym osady tego wieku charakteryzują się dużą zmiennością litologiczną w wykształceniu pionowym i rozprzestrzenieniu poziomym. Utwory czwartorzędowe mają decydujący udział w budowie rzeźby terenu, tworząc różnorodne formy morfologiczne takie, jak: pagórki czołowomorenowe, powierzchnie moreny dennej, równiny wodnolodowcowe, stożki napływowe i tarasy rzeczne. Wykształcone są głównie w postaci piasków i mułków zastoiskowych i rzecznych, piasków i żwirów rzecznych, glin zwałowych, pyłowatych i lessopodobnych, piasków i namulów jeziornych, piasków i mułków tarasów zalewowych, piasków, namulów i namulów piaszczystych den dolinnych, madów oraz torfów i rud darniowych.

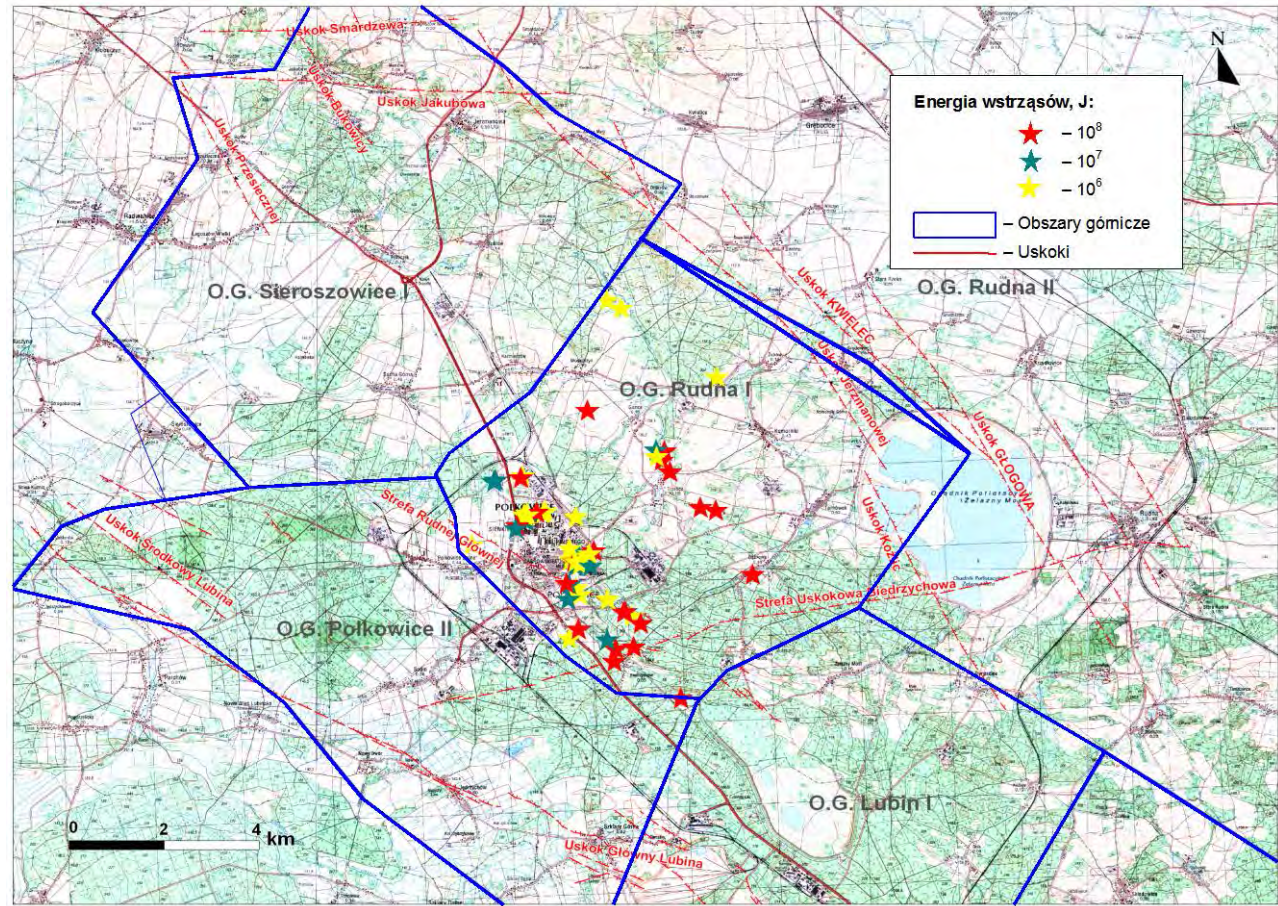
Obszar miedzionośny znajduje się na skraju monokliny przedsudeckiej, na krawędzi głębokich rozłamów tektonicznych rowu środkowej Odry. Stąd na obszarze złożowym kopalń miedzi na sieć uskokową składają się strefy tektoniczne w przewadze o charakterze zrzutowo-normalnym i zrzutowo-przesuwczym, uszeregowane wzdłuż dwóch kierunków: NW-SE i WSW-ENE (z odchyleniami w granicach 30°). Uskoki te w przewadze nie tworzą wyraźnych, liniowych dyslokacji nieciągłych, a są to strefy złożone z wiązek uskoków równoległych lub skośnych kulisowych zespołów nieciągłości, o zrzutach kilkudziesięciocentymetrowych do kilkudziesięciometrowych. Tworzą one szerokie strefy zdyslokowane, w obrębie których stwierdza się rowy, zręby i systemy schodowe. Poziomy ich zasięg jest zmienny i waha się od kilku metrów do kilku kilometrów. Do uskoków o kierunku NW-SE należą: uskok Olszy, uskok południowy Lubina, uskok środkowy Lubina, strefa uskoku głównego Lubina.

Uskoki NW-SE w części centralnej LGOM tworzą złożone, szerokie strefy zdyslokowane, w obrębie których stwierdza się rowy, zręby i systemy schodowe. Poziomy ich zasięg jest zmienny i waha się od kilku metrów do kilku kilometrów. Uskoki tego kierunku są z reguły typu grawitacyjnego, o prostej budowie. Powierzchnie ślizgu zapadają się pod kątem 65–80°, a wielkość zrzutu dochodzi do kilkudziesięciu metrów. Te strefy uskokowe są równoległe lub subrównoległe do strefy uskokowej Rudnej Głównej i wykształcone w postaci jednej lub paru głównych powierzchni uskokowych. Towarzyszą im wiązki kulisowych drobnych uskoków, które generalnie wskazują na prawoskrętno-przesuwczą parę sił, aktywną w czasie ich inicjacji.

Ze względu na usytuowanie poligonu badawczego na bardziej szczegółowe omówienie zasługuje strefa uskokowa Rudnej Głównej. Jest to strefa przebiegająca wzdłuż kierunku NW-SE i stanowi ona najpełniej rozwiniętą strukturę dyslokacyjną na obszarze ZG „Rudna” i ZG „Polkowice-Sieroszowice”. Jej łączna szerokość waha się między 400 i 1200 m. Najprostszą budowę przejawia w odcinku środkowym, gdzie zrzut koncentruje się na pojedynczej, zapadającej ku NE powierzchni uskoku

odwróconego, osiągając maksymalną wartość 30 m. Jednocześnie nieliczne na tym odcinku uskoki towarzyszące, równoległe do dyslokacji głównej, przebiegają po jej stronie NE w odległości, odpowiednio 250 i 450 m i wykazują mniejsze wartości maksymalne zrzutu (odpowiednio do 8,7 oraz 3,5 m). Pozostałe odcinki tej strefy uskokowej wykazują jednak bardziej złożoną budowę. W kierunku SE omawiana strefa uskokowa dochodzi do innej dyslokacji i jest poprzecinana przez „równoleżnikową” strefę uskokową Biedrzychowa tak, że jej ciągłość ulega przerwaniu.

Następnym systemem dyslokacyjnym w omawianej części monokliny jest zespół uskoków o przebiegu WSW-ENE, który jest związany z transeuropejskim uskokiem przesuwczym (TEF). Do tego kierunku tektonicznego należy między innymi strefa uskokowa Szklar Górnych przebiegająca przez obszar górniczy ZG „Lubin”, strefa uskokowa Biedrzychowa, która przebiega przez obszar górniczy ZG „Polkowice” i obszar górniczy ZG „Rudna”. Ponadto w północno-zachodniej części obszaru złożowego LGOM z dyslokacji o kierunku „równoleżnikowym” wyróżnić można uskoki Jakubowa, o zrzucie około 40 m na północ. Uskok ten wraz z uskokiem Smardzowa (o zrzucie 30–80 m) tworzy tektoniczny rów Turowa. Rejon badań wraz z powyższymi strukturami tektonicznymi przedstawiono na rysunku 1.3.



Rys. 1.3. Legnicko-Głogowski Okręg Węglowy – rejon badań wraz ze strukturami geologicznymi i ogniskami wstrząsów górotworu

2. Badania sejsmiczne

Jednym z podstawowych czynników mających wpływ na efekt sejsmiczny na powierzchni jest zróżnicowana budowa litologiczna warstw nadkładu czwartorzędowego, szczególnie przypowierzchniowej warstwy podłoża gruntowego, powodująca wzmocnienie drgań gruntu. Parametrem fizycznym, charakteryzującym wpływ warstwy nadkładu na intensywność drgań, jest współczynnik amplifikacji drgań W_f , który zmienia się w danym miejscu w zależności od charakterystyki częstotliwościowej wstrząsów oraz budowy geologicznej warstw nadkładu.

W badaniach nad określaniem wpływu budowy geologicznej na efekt sejsmiczny na powierzchni, wykorzystano zalecenia zawarte w normie EUROKOD 8, zgodnie z którymi jest konieczne wykonywanie pomiarów sejsmicznych *in situ* w celu określenia prędkości propagacji fali poprzecznej do głębokości kilkudziesięciu metrów. Do wykonywania tych pomiarów zastosowano metodę wielokanałowej analizy fal powierzchniowych MASW. Wyniki tych badań wraz z rozpoznaniem budowy geologicznej stanowiły podstawę do obliczenia współczynnika amplifikacji W_f w funkcji dominującej częstotliwości drgań wymuszających (2–10 Hz). W obliczeniach zastosowano algorytm polegający (Sawarienski 1959) na rozwiązaniu równania falowego w ośrodku sprężystym z tłumieniem (górotwór opisany według modelu Kelvina)

$$W_1 = (2m_1\kappa) / (A\cos \kappa b + i B\sin \kappa b) \quad (2.1)$$

gdzie:

A i B – współczynniki zespolone:

$$A = (m_1c + m_1 - cm_1/m_0)\kappa,$$

$$B = m_1^2/m_0\kappa^2 - c^2 - c,$$

c = stała,

$$m_1 = \alpha_1\rho_1,$$

$$m_0 = \alpha_0\rho_0,$$

ρ_0 – gęstość ośrodka w podłożu skalnym,

ρ_1 – gęstość ośrodka w nadkładzie,

α_0 – prędkość fali sejsmicznej w podłożu skalnym,

α_1 – prędkość fali sejsmicznej w nadkładzie,

$\kappa = \kappa_1 - i\kappa_2$, κ_2 – tłumienie amplitudy, κ_1 – składnik określający dyspersję,

$b = \omega H/\alpha_1$, H – miąższość warstwy nadkładu, $\omega = 2\pi f$, f – częstotliwość drgań.

2.1. Metoda analizy fal powierzchniowych MASW

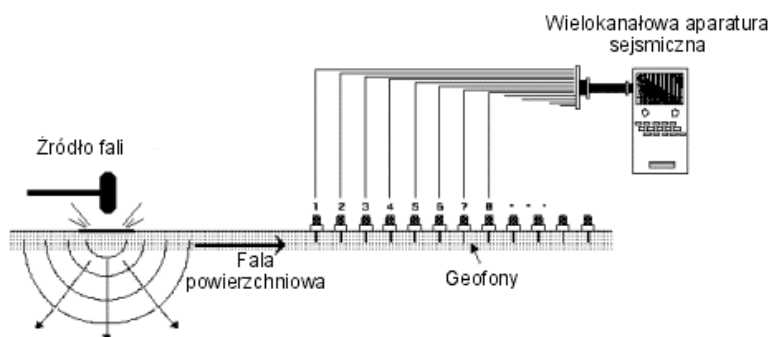
Metoda wielokanałowej analizy fal powierzchniowych MASW po raz pierwszy została zastosowana w geotechnice i geofizyce w 1999 roku, chociaż wersje wstępne pojawiły się kilka lat wcześniej (Park i inni 1999a). MASW jest odmianą metody sejsmicznej, która umożliwia wyznaczanie rozkładu prędkości fali S w funkcji głębokości, na podstawie analizy powierzchniowych fal Rayleigha. W metodzie tej jest wykorzystywany sposób rejestracji i przetwarzania danych, szeroko stosowany od wielu lat w przemyśle naftowym w sejsmice refleksyjnej. Jednak, podczas gdy

w tradycyjnej sejsmice fale Rayleigha są uważane za szum, w metodzie MASW fale te stanowią sygnał użyteczny i z tego powodu metoda wymaga nieco innego podejścia na etapie zbierania i przetwarzania danych.

Prace z wykorzystaniem metody MASW składają się z trzech etapów:

- zbieranie danych (pomiaru polowe),
- obliczanie krzywych dyspersji dla poszczególnych rejestracji,
- inwersja krzywych dyspersji w celu obliczenia rozkładów prędkościowych.

Rejestracja danych odbywa się za pomocą wielokanałowej aparatury sejsmicznej. Liczba kanałów może być różna, jednak nie mniejsza niż 12. Schemat typowej linii pomiarowej w tego typu pomiarach przedstawiono na rysunku 2.1. Odległość między źródłem fali a najbliższym geofonem musi być na tyle duża, aby zapewnić powstanie właściwej fali powierzchniowej. Najdalszy geofon zwykle jest umieszczany w miejscu, gdzie szum zaczyna dominować nad sygnałem użytecznym.

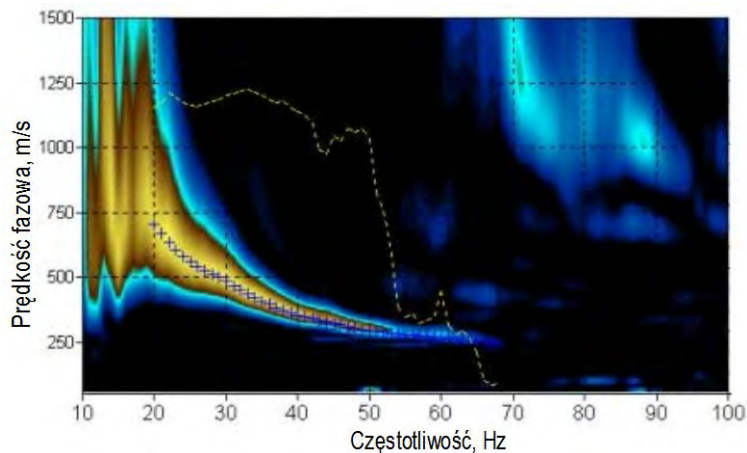


Rys. 2.1. Schemat układu pomiarowego w metodzie MASW

Ważne jest, aby były rejestrowane niskie częstotliwości. Niskoczęstotliwościowe składowe fali powierzchniowej bowiem zwiększają zasięg głębokościowy metody oraz czynią proces inwersji bardziej stabilny. Dlatego istotne jest, aby w czasie pomiaru nie stosować filtracji, a także zadbać o odpowiednie wzmocnienie niskich częstotliwości.

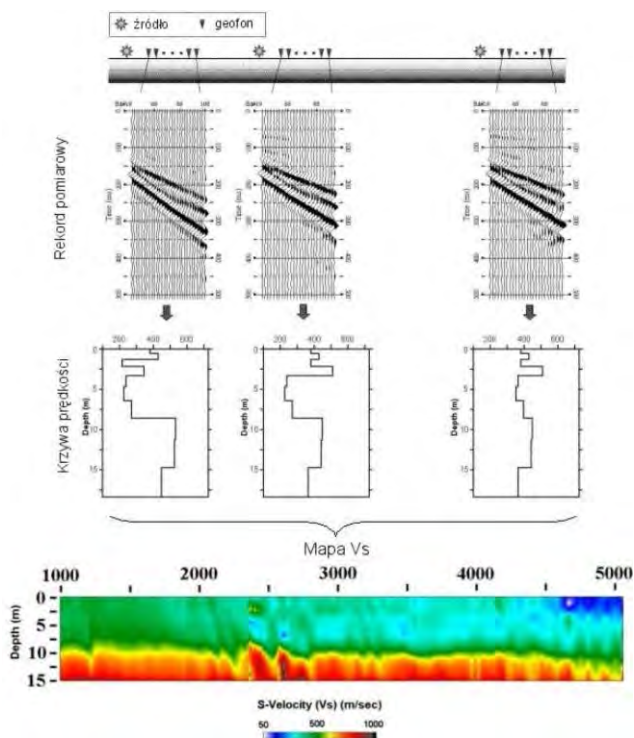
Rejestracje sejsmiczne są poddawane analizie pod kątem określenia dyspersji fal powierzchniowych. Ten etap jest szczególnie ważny, ponieważ ma największy wpływ na końcowy kształt krzywej prędkości. Do inwersji jest wykorzystywana wyłącznie krzywa dyspersji, stąd im dokładniej będzie wyznaczona dla każdej rejestracji, tym lepiej będzie określony rozkład prędkości w badanym ośrodku. Przykładową mapę dyspersji dla fal powierzchniowych przedstawiono na rysunku 2.2.

Rozkład prędkości v_s , w procesie inwersji, jest wyliczany na podstawie krzywej dyspersji oraz gęstości i współczynnika Poissona (Xia i inni 1999). W kolejnych iteracjach jest modyfikowana tylko prędkość fali S – inne parametry pozostają niezmienione. Model wyjściowy ośrodka jest zdefiniowany przez prędkości fali P i S , gęstość oraz miąższości poszczególnych warstw.



Rys. 2.2. Mapa dyspersji z wyznaczoną krzywą dyspersji dla fal powierzchniowych Rayleigha (www.kgs.ku.edu/software/surfseis/index.html)

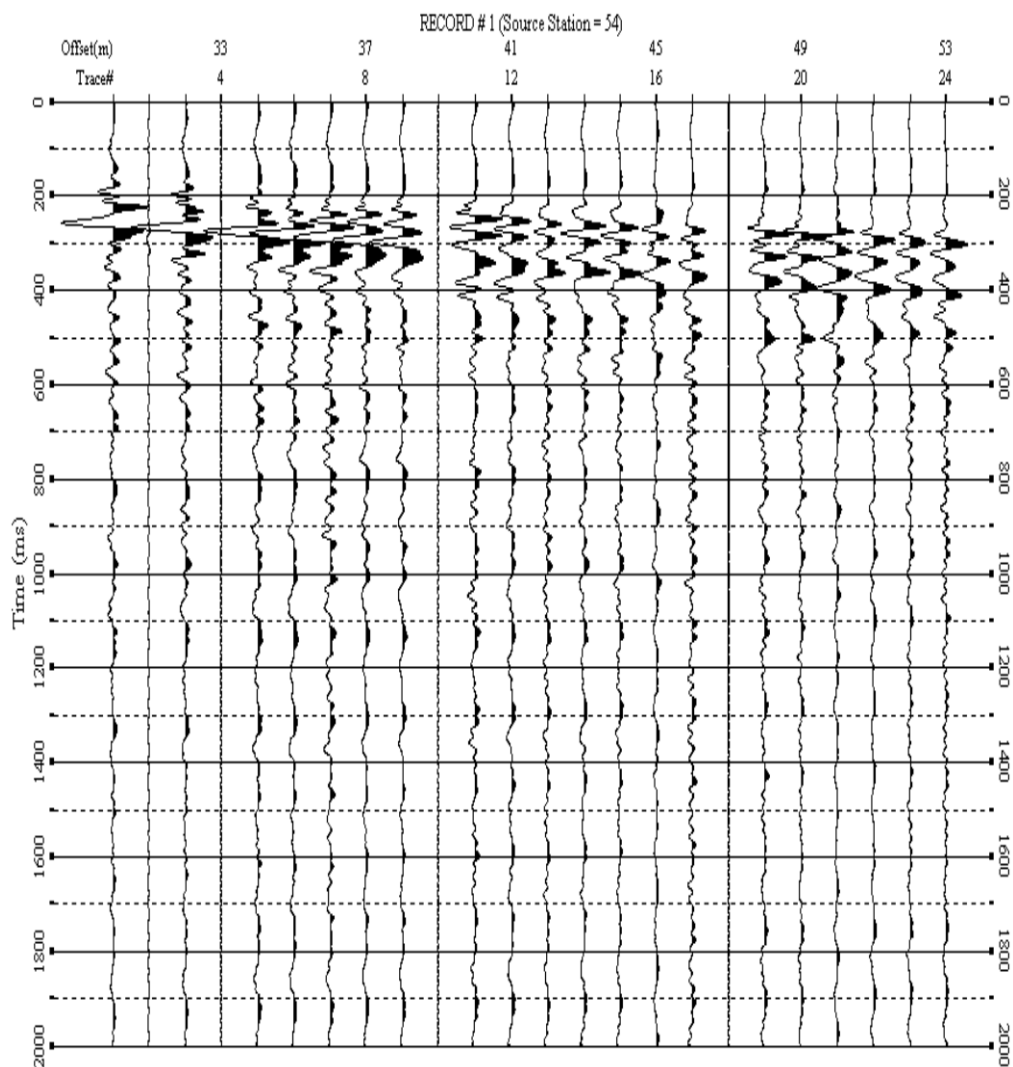
Z każdego zarejestrowanego rekordu jest tworzona jedna krzywa rozkładu prędkości v_s . Przemieszczając układ pomiarowy o zadany interwał można stworzyć kilka takich krzywych i na ich podstawie konstruować mapy prędkościowe (rys. 2.3). Wielkość interwału określa stopień szczegółowości mapy.



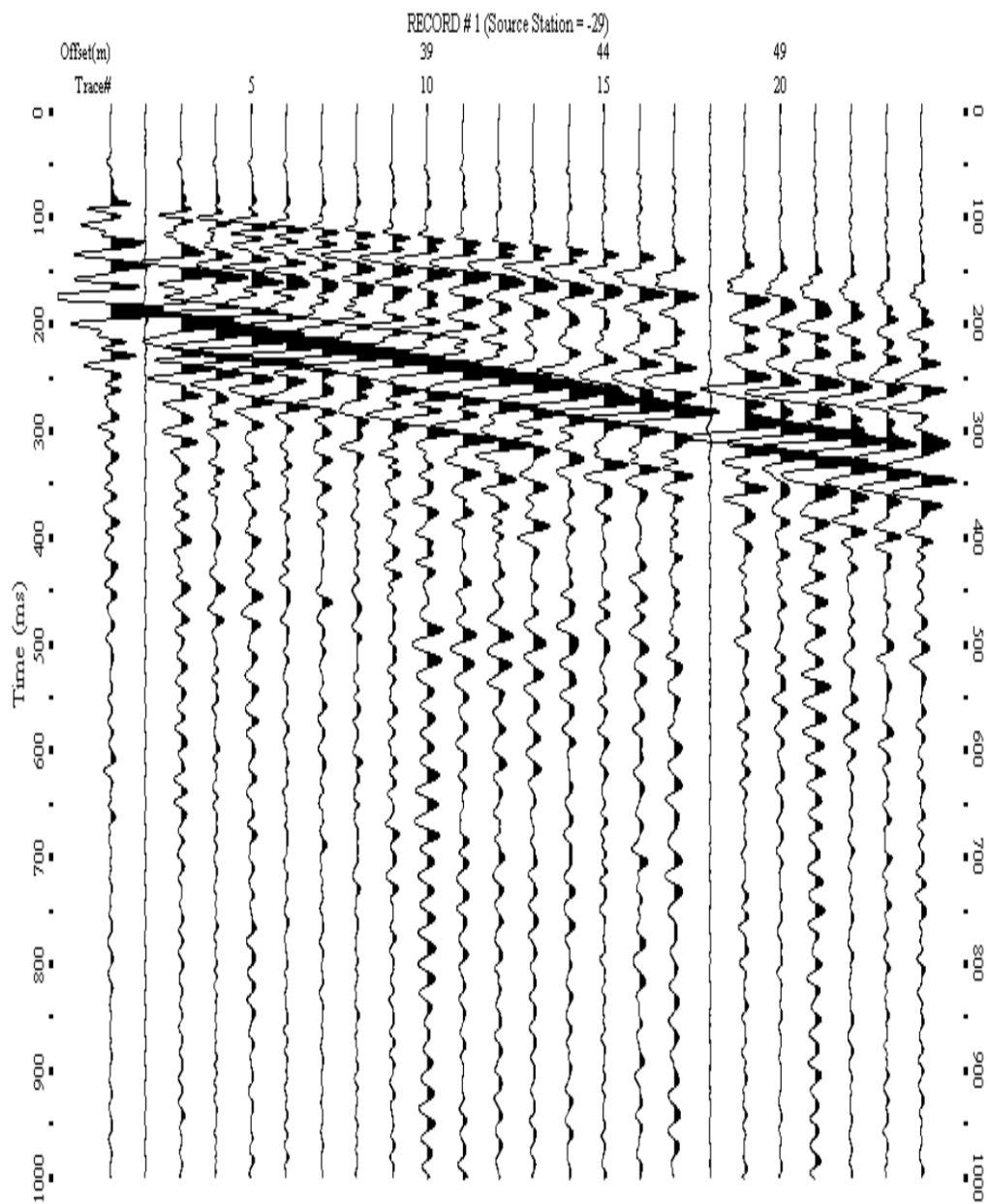
Rys. 2.3. Schemat pomiarów i interpretacji – metoda MASW (www.kgs.ku.edu/software/surfseis/index.html)

2.2. Wyniki pomiarów sejsmicznych

Pomiary sejsmiczne wykonano metodą MASW w dwóch wydzielonych rejonach badawczych: GZW i LGOM. Wzdłuż profili sejsmicznych rozmieszczono 24 geofony, a fale sejsmiczną wzbudzano uderowo za pomocą młota. Przykładowe rejestracje pomiarów przedstawiono na rysunkach 2.4 i 2.5. W wyniku przeprowadzonych badań zarejestrowano dziewięć rekordów sejsmicznych po 24 trasy w każdym rejonie badań. Do interpretacji wyników wykorzystano specjalistyczne oprogramowanie SurfSeis firmy Kansas Geological Survey. W efekcie interpretacji wszystkich rekordów uzyskano mapę prędkości poprzecznej fali sejsmicznej v_s .



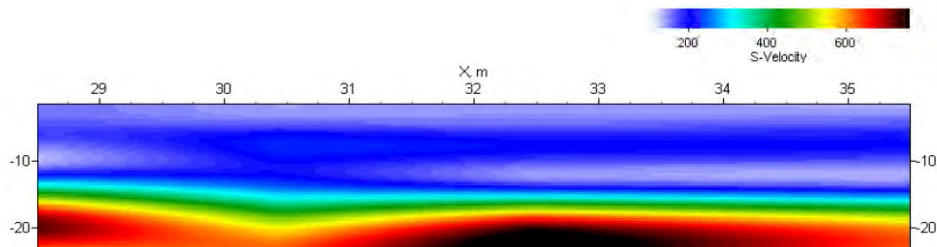
Rys. 2.4. Przykładowy rekord sejsmiczny uzyskany podczas pomiarów na terenie GZW



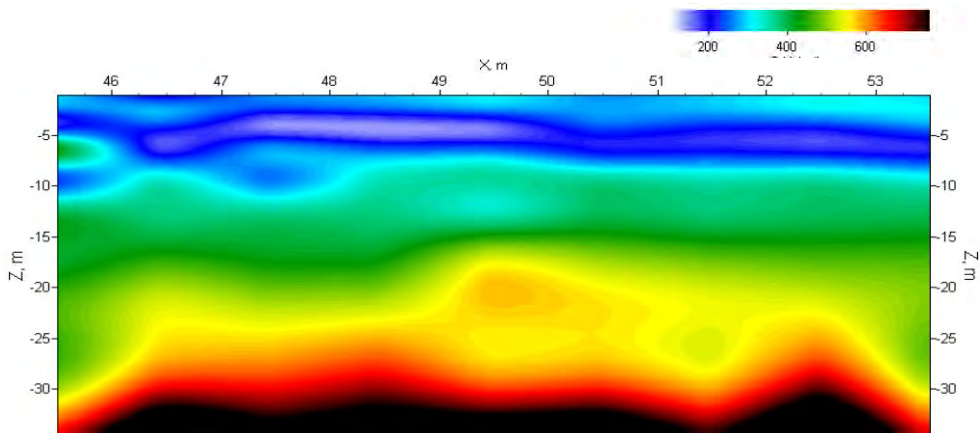
Rys. 2.5. Przykładowy rekord sejsmiczny uzyskany podczas pomiarów na terenie KGHM (miejscowość Moskorzyn)

Na obszarze GZW pomiary sejsmiczne wykonano w rejonie zainstalowania powierzchniowych stanowisk sejsmometrycznych – przy następujących ulicach: Wierzbowej, Kingi (rejon KWK Bielszowice); Dębowej, Kochłowskiej (rejon KWK Halemba); Cynkowej (rejon KWK Pokój); Ceglanej (rejon KWK Polska-Wirek).

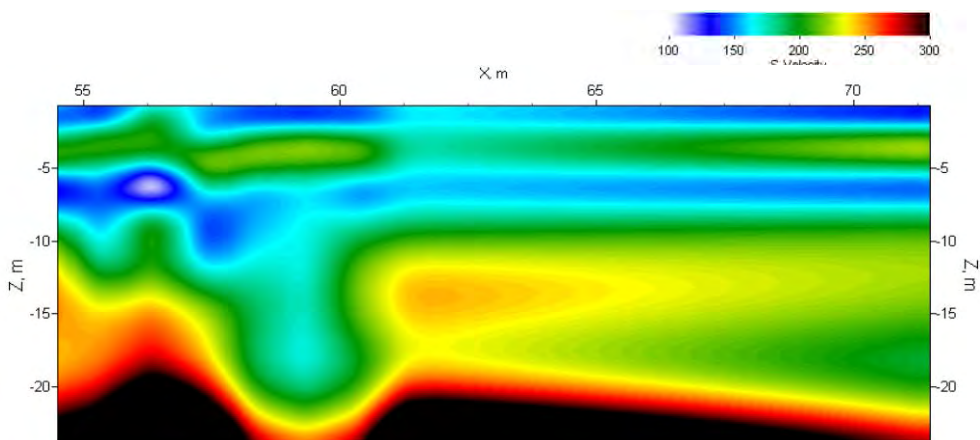
Na rysunkach 2.6–2.11 przedstawiono odpowiednie rozkłady prędkości propagacji poprzecznej fali sejsmicznej.



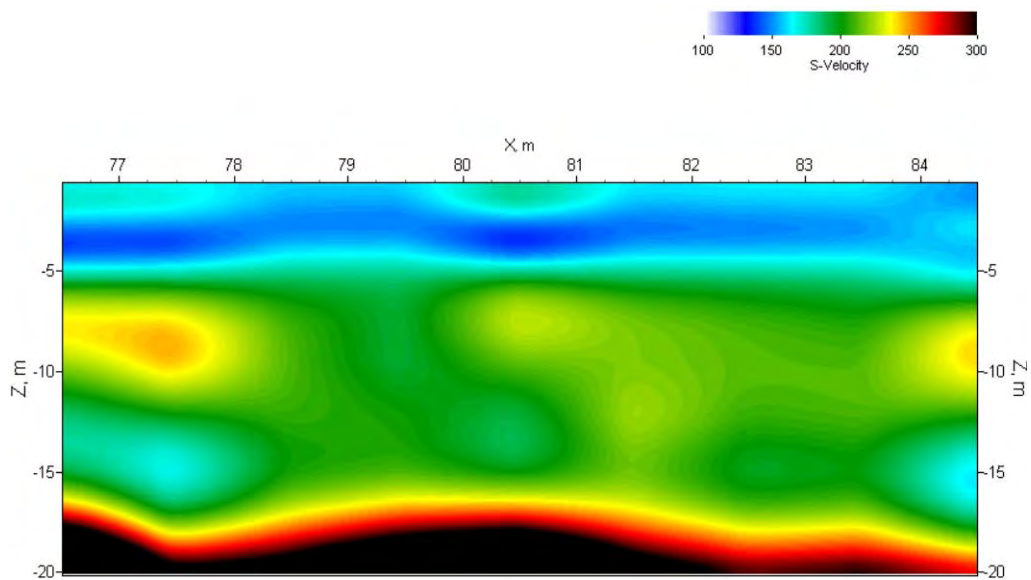
Rys. 2.6. Rozkład prędkości propagacji (m/s) poprzecznej fali sejsmicznej wzdłuż profilu w rejonie ulicy Cynkowej



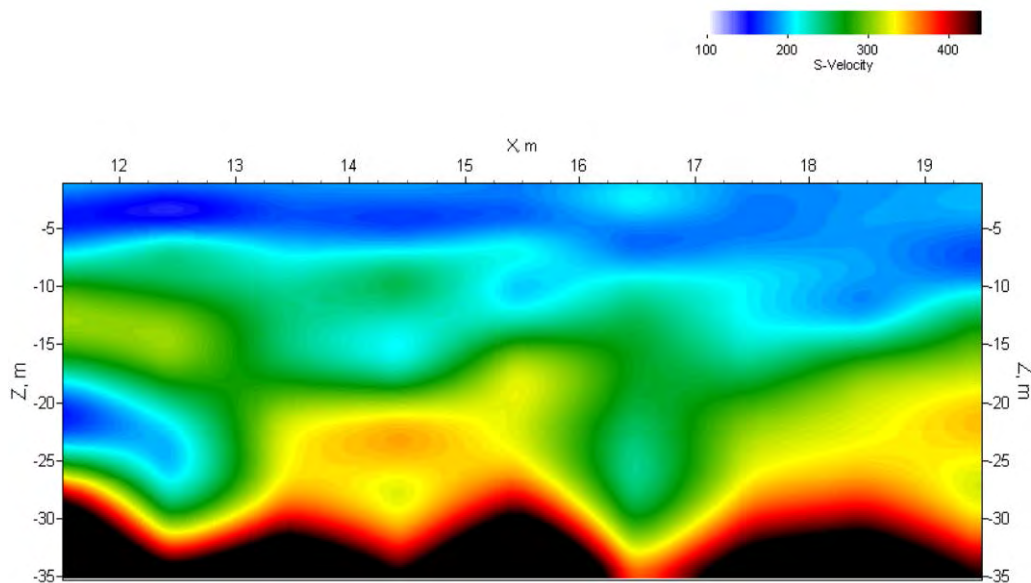
Rys. 2.7. Rozkład prędkości propagacji (m/s) poprzecznej fali sejsmicznej wzdłuż profilu w rejonie ulicy Dębowej



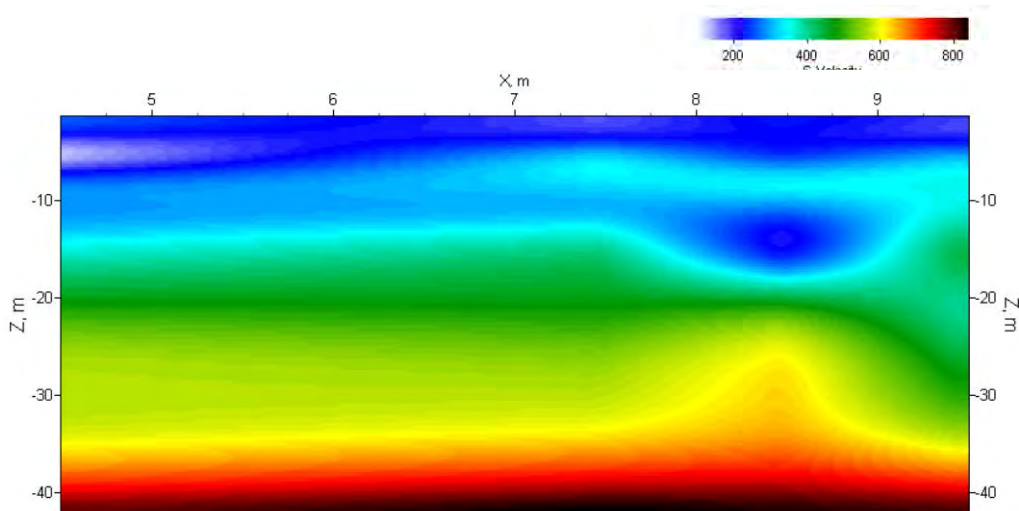
Rys. 2.8. Rozkład prędkości propagacji (m/s) poprzecznej fali sejsmicznej wzdłuż profilu w rejonie ulicy Kingi



Rys. 2.9. Rozkład prędkości propagacji (m/s) poprzecznej fali sejsmicznej wzdłuż profilu w rejonie ulicy Kochłowieckiej



Rys. 2.10. Rozkład prędkości propagacji (m/s) poprzecznej fali sejsmicznej wzdłuż profilu w rejonie ulicy Wierzbowej (w pobliżu ulicy Halembskiej)



Rys. 2.11. Rozkład prędkości propagacji (m/s) poprzecznej fali sejsmicznej wzdłuż profilu w rejonie ulicy Ceglanej

Wartości prędkości fali poprzecznej na profilach zlokalizowanych na terenie GZW zmieniały się w zakresie od 120 do 1250 m/s. Głębokość penetracji ośrodka oscylowała w przedziale od 20 do 40 m. Na profilach przy ulicy Dębowej, Ceglanej i Cynkowej profil prędkościowy sięgał prawdopodobnie do stropu twardego podłoża, o czym świadczyły prędkości fali poprzecznej powyżej 800 m/s. Na pozostałych profilach (ulice Kingi, Kochłowska i Wierzbowa) profil obejmował tylko warstwy utworów czwartorzędowych.

W utworach czwartorzędowych, tworzących nadkład, prędkości fali poprzecznej zmieniały się generalnie w zakresie 150–300 m/s. Utwory leżące najpłycej charakteryzowały się prędkościami tego typu fali poniżej 200 m/s. W tablicy 2.1 zestawiono zakresy wartości na poszczególnych profilach, głębokość penetracji oraz szacunkową miąższość warstwy o najmniejszych prędkościach fali S.

Tablica 2.1. Zestawienie wyników pomiarów sejsmicznych wykonanych na terenie GZW

Rejon badań (ulica)	Prędkość fali poprzecznej S		Głębokość	
			penetracji utworów	zalegania utworów – prędkość < 200 m/s
	V_{min} , m/s	V_{max} , m/s	H , m	h , m
Cynkowa	177	820	25	ok. 15
Dębowa	120	945	35	10
Kingi	135	420	25	10
Kochłowska	150	295	20	5
Wierzbowa	164	423	35	7
Ceglana	105	850	40	10

Na wszystkich profilach pomiarowych uzyskano rozkład prędkościowy ośrodka ze stopniowo wzrastającą prędkością z głębokością. Na niektórych profilach

występowały drobne niejednorodności i lokalne odstępstwa od modelu płasko-równoległego (np. profil przy ulicy Kingi i Wierzbowej).

Na podstawie wyników pomiarów sejsmicznych, a także danych z publikacji (Lasek i inni 2003) oraz rozpoznania budowy geologicznej, obliczono współczynnik amplifikacji W_f w rejonie każdego z powierzchniowych stanowisk sejsmometrycznych. Wartości te, podane w tablicy 2.2, wskazują na wyraźne zróżnicowanie współczynnika W_f i zmieniają się od 1,1 do 1,9. Świadczy to o tym, że amplitudy drgań gruntu ulegały prawie dwukrotnemu wzmocnieniu.

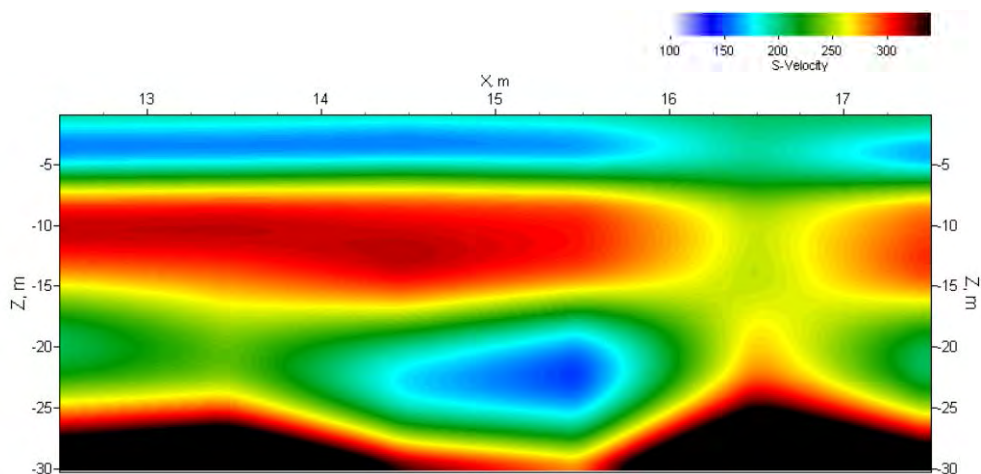
Tablica 2.2. Zestawienie wartości współczynnika amplifikacji określonego w GZW

Lokalizacja powierzchniowych stanowisk sejsmometrycznych		Współrzędne stanowiska (układ Suchej Góry)			Współczynnik amplifikacji
kopalnia	ulica	X, m	Y, m	Z, m n.p.m.	
„Bielszowice”	Halembaska	17285	2540	243	1,3
	Kingi	15850	4116	234	1,5
„Halemba”	Dębowa	17290	510	250	1,6
	Kochłowska	17590	-1615	252	1,3
„Polska-Wirek”	Suchogórnica	15395	-1348	298	1,7
„Pokój”	Cynkowa	14265	-1465	285	1,4
„Śląsk”	Emerytalna	20550	-6550	253	1,2
	Owsiana	20350	-3390	254	1,1
	Panewnicka	20125	-3590	255	1,9

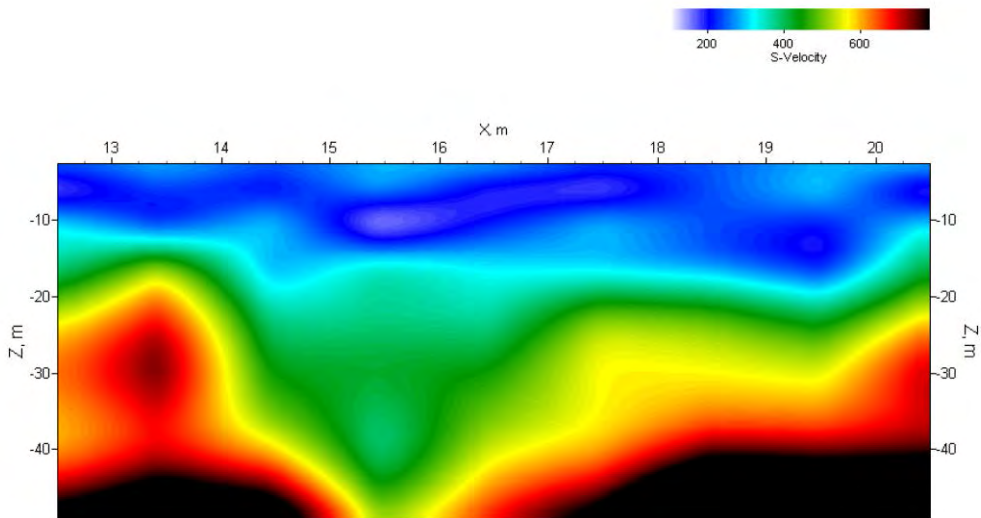
Na terenie LGOM pomiary sejsmiczne wykonano:

- w rejonie ulic Hubała, Miedzianej i Sosnowej w Polkowicach,
- w miejscowości Moskorzyn, Polkowice Dolne, Sucha Góra, Szklary Górne.

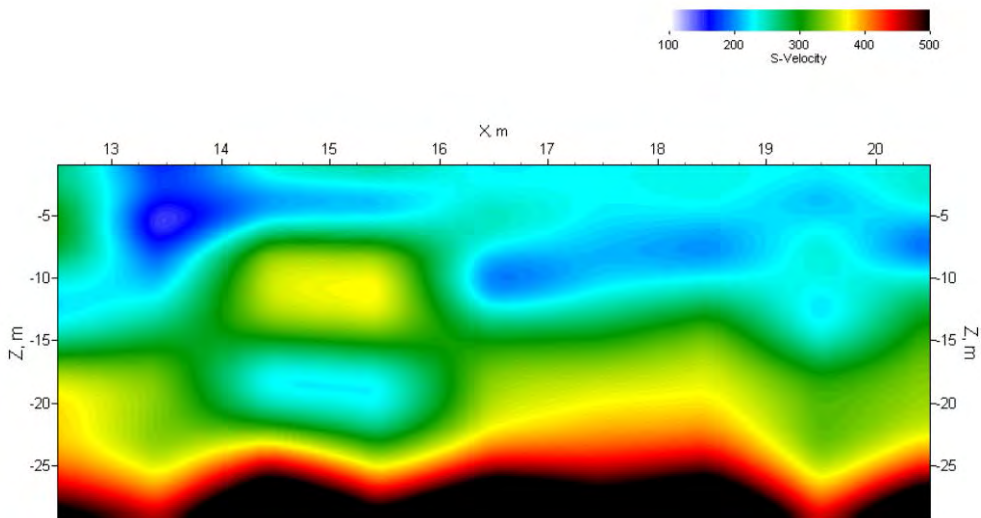
Uzyskane rozkłady prędkości propagacji poprzecznej fali sejsmicznej przedstawiono na rysunkach 2.12–2.18.



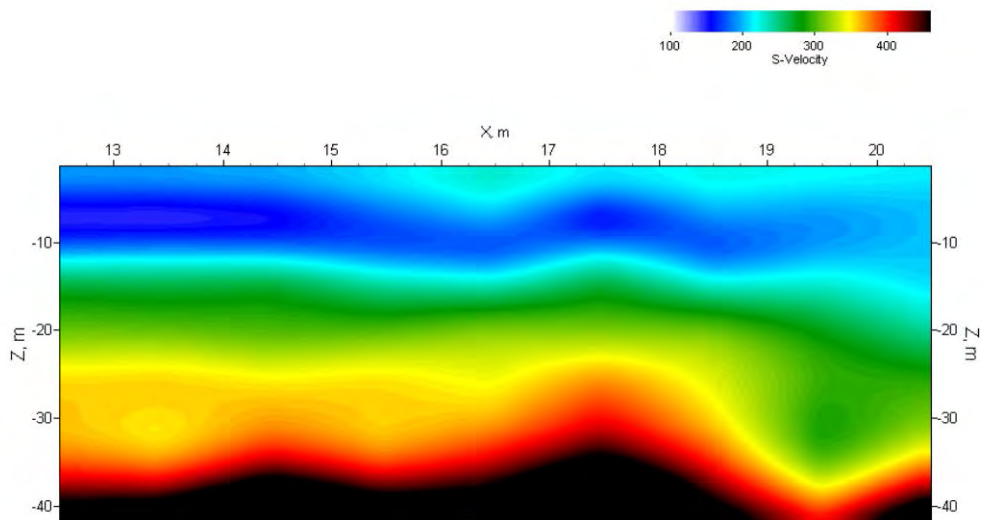
Rys. 2.12. Rozkład prędkości propagacji (m/s) poprzecznej fali sejsmicznej wzdłuż profilu w rejonie ulicy Hubała w Polkowicach



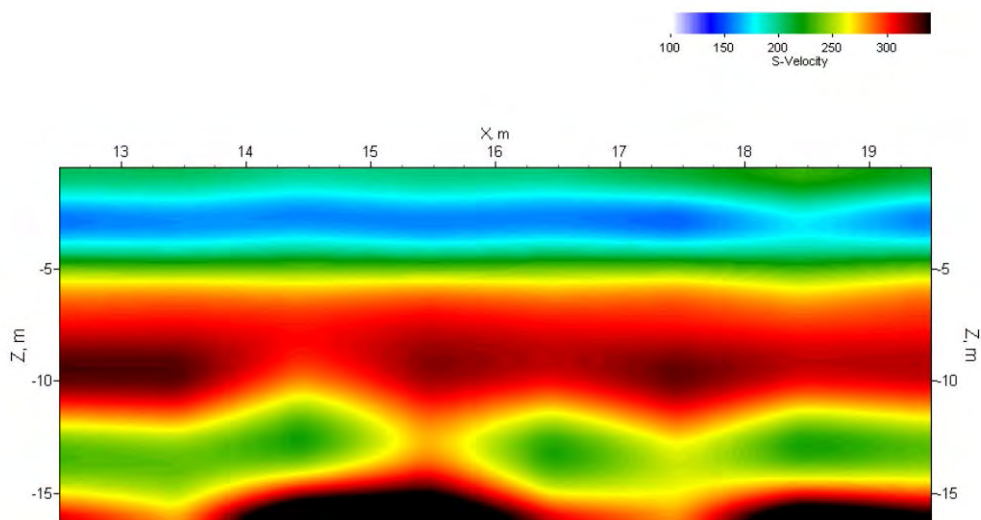
Rys. 2.13. Rozkład prędkości propagacji (m/s) poprzecznej fali sejsmicznej wzdłuż profilu w rejonie ulicy Miedzianej w Polkowicach



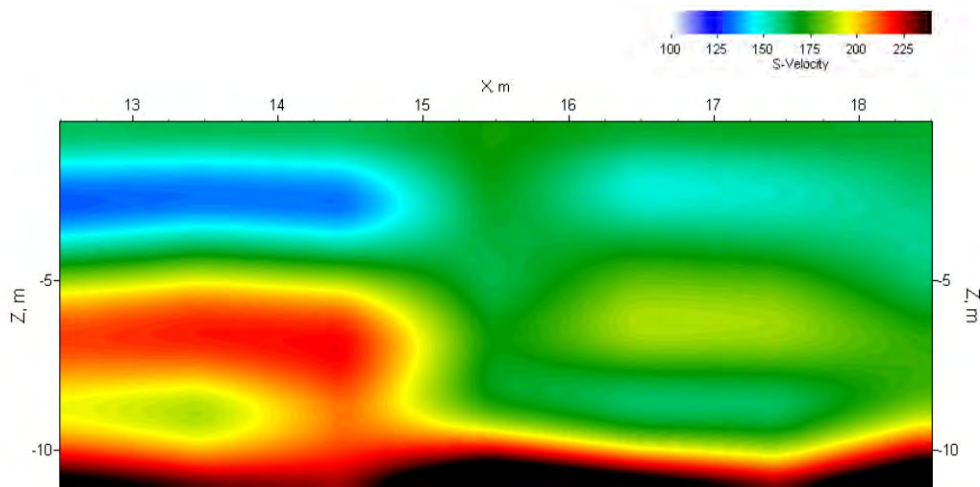
Rys. 2.14. Rozkład prędkości propagacji (m/s) poprzecznej fali sejsmicznej wzdłuż profilu w rejonie ulicy Sosnowej w Polkowicach



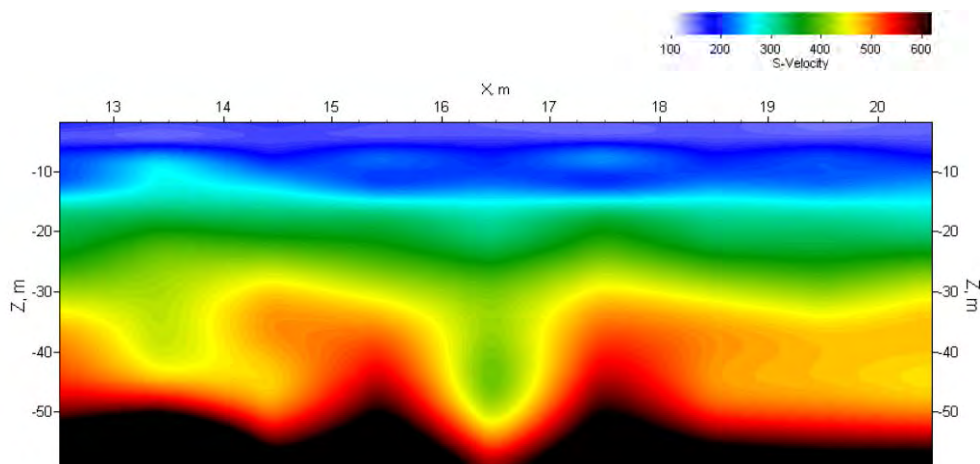
Rys. 2.15. Rozkład prędkości propagacji (m/s) poprzecznej fali sejsmicznej wzdłuż profilu w rejonie Moskorzyna



Rys. 2.16. Rozkład prędkości propagacji (m/s) poprzecznej fali sejsmicznej wzdłuż profilu w rejonie Polkowic Dolnych



Rys. 2.17. Rozkład prędkości propagacji (m/s) poprzecznej fali sejsmicznej wzdłuż profilu w rejonie Suchej Góry



Rys. 2.18. Rozkład prędkości propagacji (m/s) poprzecznej fali sejsmicznej wzdłuż profilu w rejonie Szklar

Wartości prędkości fali poprzecznej wzdłuż profili zlokalizowanych na obszarze LGOM zmieniały się w zakresie od 130 do 990 m/s. Głębokość penetracji ośrodka oscylowała w przedziale od 12 do 60 m. Z wyjątkiem profilu zlokalizowanego w miejscowościach Sucha Góra i Polkowice Dolne, profile prędkościowe sięgały najprawdopodobniej do stropu twardego podłoża, o czym świadczyły prędkości fali poprzecznej wynoszące powyżej 650 m/s.

Zwracał także uwagę odmienny od pozostałych rozkład prędkości występujący wzdłuż profilu w rejonie ulicy Hubała. Stwierdzono tu dużą niejednorodność rozkładu prędkości. Wartości prędkości wzrastały stopniowo z głębokością do około 300 m/s do głębokości około 15 m, następnie malały do wartości 150–200 m/s, a następnie znowu stopniowo wzrastały, osiągając wartość około 500 m/s na głębokości 30 m.

W utworach czwartorzędowych, tworzących nadkład, prędkości fali poprzecznej zmieniały się w zakresie 150–300 m/s. Utwory leżące najpłycej charakteryzowały się prędkościami tego typu fali poniżej 200 m/s. Zakresy wartości na poszczególnych profilach, głębokość penetracji oraz szacunkową miąższości warstwy o najmniejszych prędkościach fali S zestawiono w tablicy 2.3.

Tablica 2.3. Zestawienie wyników pomiarów wykonanych na obszarze LGOM

Rejon badań	Prędkość fali poprzecznej S		Głębokość	
			penetracji utworów	zalegania utworów – prędkość < 200 m/s
	V_{min} , m/s	V_{max} , m/s	H , m	h , m
ul. Hubala	152	502	30	5
ul. Miedziana	172	990	45	10
ul. Sosnowa	160	660	30	15
Moskorzyn	144	675	40	12
Polkowice Dolne	148	400	16	5
Sucha Góra	130	250	12	10
Szklary Górne	125	650	60	10

Generalnie, na obszarze badawczym w LGOM występuje lokalnie zmienny nadkład warstw czwartorzędowych (od kilku do ponad 100 m), charakteryzujący się małymi prędkościami propagacji fal sejsmicznych. Współczynnik amplifikacji określono na podstawie rozpoznania wykształcenia litologicznego i miąższościowego utworów czwarto- i trzeciorzędowych (Mutke 2004) oraz na podstawie przeprowadzonych terenowych pomiarów sejsmicznych udokumentowanych powyżej. Rozkład wartości współczynnika amplifikacji dla pasma częstotliwości 2–10 Hz, w którym zawiera się charakterystyka najsilniejszych wstrząsów występujących w LGOM podano w tablicy 2.4 i na rysunku 2.19. Zmienia się on od 0,9 do 1,9.

Tablica 2.4. Zestawienie wartości współczynnika amplifikacji określonych w LGOM

Rejon badań	Współrzędne stanowiska (układ lokalny)			Współczynnik amplifikacji
	X , m	Y , m	Z , m	
ul. Hubala	30450	5570	182	1,4
ul. Kolejowa	30950	5980	180	1,2
ul. 3 Maja	31129,5	5549,5	180	1,2
ul. Sosnowa	30531,5	6717,5	181	1,8
ul. Miedziana	39864	5756	181	1,2
ul. Akacjowa	30578	5882	186	1,4
Szklary Górne	24110	6990	178	1,6
Biedrzychów	27787	7499	174	1,8
Grodowiec	35393	12450	136	1,2
Guzice	33765	7731	135	1,7
Komorniki	33453	10671	119	1,2
Moskorzyn	35128	6430	130	1,4
Pieszkowice	28511	10200	201	1,8
Tarnówek	32192	12006	126	1,2
Żuków	35346	10799	99	1,4
Trzebcz	32672	8284	150	1,6

3. Pomiary sejsmometryczne

3.1. Pomiary sejsmometryczne w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym

Dla realizacji celu badań poligon badawczy zlokalizowano w aktualnie najbardziej aktywnym rejonie sejsmicznym w GZW, którym jest strefa uskoku kłodnickiego. W jej sąsiedztwie działalność górnictw prowadzi kilka kopalń węgla kamiennego. Poligon badawczy został zlokalizowany na obszarach kopalń: „Bielszowice”, „Halemba”, „Śląsk”, „Pokój”, „Polska-Wirek” i składał się z dziewięciu powierzchniowych trójskładowych stanowisk sejsmometrycznych wyposażonych w aparaturę AMAX-99. Aparatura ta jest wielokanałową, cyfrową aparaturą pomiarową przeznaczoną do rejestracji przyspieszeń drgań na powierzchni. Podstawowe jej parametry są następujące:

- zakres częstotliwości 0,5–1000 Hz,
- automatyczne wyzwalanie zapisów wstrząsów,
- zapisywanie danych w bazie o wstrząsach,
- system ciągłego zapisu danych,
- oprogramowanie umożliwiające analizę zapisów.

Aparatura ta działa na zasadzie czuwania i rejestracji wszystkich zjawisk po przekroczeniu przez sygnał sejsmiczny ustawionego programowo, przez użytkownika, progu drgań.

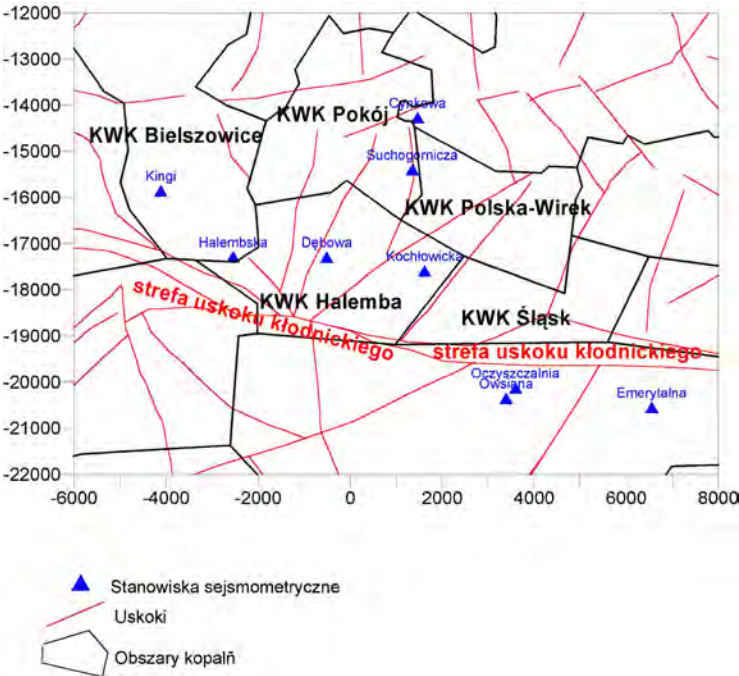
Zestawienie podstawowych danych o lokalizacji stanowisk pomiarowych podano w tablicy 3.1, a ich położenie w rejonie badań przedstawiono na rysunku 3.1.

Tablica 3.1. Powierzchniowe stanowiska sejsmometryczne w GZW

Lokalizacja powierzchniowych stanowisk sejsmometrycznych		Współrzędne stanowiska (układ Suchej Góry)		
kopalnia	ulica	X, m	Y, m	Z, m n.p.m.
„Bielszowice”	Halembka	17285	2540	243
	Kingi	15850	4116	234
„Halemba”	Dębowa	17290	510	250
	Kochłowska	17590	–1615	252
„Polska-Wirek”	Suchogórnica	15395	–1348	298
„Pokój”	Cynkowa	14265	–1465	285
„Śląsk”	Emerytalna	20550	–6550	253
	Owsiana	20350	–3390	254
	Panewnicka	20125	–3590	255

W okresie prowadzenia obserwacji sejsmometrycznych, od czerwca 2003 do grudnia 2004, przeanalizowano wszystkie wstrząsy, z wyżej wyspecyfikowanych stanowisk sejsmometrycznych, dla których uzyskano największą liczbę rejestracji przyspieszeń drgań gruntu. W sumie zbiór danych poddanych analizie obejmował 63 wstrząsy. Charakteryzowały się one energią sejsmiczną rzędu od 10^6 do 10^7 J

i należały do najsilniejszych, jakie wystąpiły w tym okresie w GZW. Odległość epicentralna do poszczególnych stanowisk powierzchniowych wynosiła od 0,350 do 10 km w przypadku najsilniejszych wstrząsów.



Rys. 3.1. Lokalizacja powierzchniowych stanowisk sejsmometrycznych w GZW

Szczegółowe dane charakteryzujące każdy z analizowanych wstrząsów zestawiono w tablicy 3.2.

Tablica 3.2. Zestawienie przyspieszeń drgań gruntu dla wstrząsów z GZW

Data Czas Energia, J Kopalnia X, m Y, m	Rejon badań (ulica)	Odległość epicentralna d, km	Przyspieszenia pomierzone mm/s²				Przyspieszenia po redukcji uwzględniającej wartość amplifikacji W _f mm/s²			
			a _{px}	a _{py}	a _{pz}	a _{pwyp}	a _{zx}	a _{zy}	a _{zz}	a _{zwyp}
03-07-02 3:40 6,0·10 ⁶ „Bielszowice” 17600 2000	Halembaska	0,63	150	120	190	270	115	92	146	208
	Kingi	2,75	56	68	79	118	39	47	54	82
	Dębowa	1,52	89	112	121	187	57	72	78	121
	Kochłowska	3,62	10	12	19	25	8	15	15	23
	Suchogórnica	4,01	11	9	12	19	6	5	7	11
03-07-03 14:01 2,0·10 ⁶ „Bielszowice” 17640 2240	Halembaska	0,46	78	69	103	146	60	53	79	113
	Kingi	2,59	31	65	29	78	21	45	20	54
	Dębowa	1,77	38	40	48	73	25	26	31	47
	Kochłowska	3,86	12	9	16	22	9	13	13	20
	Suchogórnica	4,23	6	12	10	17	4	7	6	10

03-07-24 6:26 8,0·10 ⁷ „Bielszowice” 17560 2060	Halembaska	0,55	190	520	210	592	146	400	162	455
	Kingi	2,67	34	48	47	75	23	33	32	52
	Dębowa	1,57	31	54	67	91	20	35	43	59
	Kochłowska	3,68	19	21	18	34	15	14	14	25
	Suchogórnica	4,04	12	19	17	28	7	11	10	17
	Cynkowa	4,83	6	6	10	13	4	4	7	9
	Emerytalna	9,11	7	12	9	17	6	10	8	14
	Owsiana	6,12	24	15	19	34	22	14	17	31
03-07-29 13:00 9,0·10 ⁶ „Bielszowice” 17670 2160	Halembaska	0,54	120	170	240	318	92	131	185	244
	Kingi	2,67	19	21	18	34	13	14	12	23
	Dębowa	1,69	28	34	57	72	18	22	37	46
	Kochłowska	3,78	15	18	23	33	12	18	18	28
	Suchogórnica	4,18	16	14	21	30	9	8	12	18
	Cynkowa	4,97	6	4	11	13	4	3	8	9
03-08-08 15:38 2,0·10 ⁶ „Pokój” 16740 -920	Halembaska	3,50	8	11	16	21	6	8	12	16
	Kingi	5,11	10	12	15	22	7	8	10	15
	Dębowa	1,53	28	24	58	69	18	15	37	44
	Kochłowska	1,10	45	50	110	129	35	87	87	128
	Suchogórnica	1,41	38	36	52	74	22	21	31	43
	Cynkowa	2,53	12	14	16	24	9	10	11	17
	Emerytalna	6,80	12	9	10	18	10	8	8	15
	Owsiana	4,37	21	20	16	33	19	18	15	30
03-08-09 15:31 9,0·10 ⁷ „Bielszowice” 17550 2260	Halembaska	0,39	250	930	290	1006	192	715	223	774
	Kingi	2,52	62	98	95	150	43	68	66	103
	Dębowa	1,77	88	123	134	202	57	79	86	130
	Kochłowska	3,88	16	18	21	32	13	17	17	27
	Suchogórnica	4,20	12	11	9	19	7	6	5	11
	Cynkowa	4,97	6	9	12	16	4	6	9	12
	Owsiana	6,31	5	7	8	12	5	6	7	11
	Panewnicka	6,39	26	31	22	46	14	16	12	24
03-08-12 4:59 6,0·10 ⁷ „Halemba” 18611 -1322	Halembaska	4,08	36	40	46	71	28	31	35	54
	Kingi	6,10	16	20	29	39	11	14	20	27
	Dębowa	2,26	45	54	79	106	29	35	51	68
	Kochłowska	1,06	58	49	69	103	46	54	54	89
	Suchogórnica	3,22	35	37	51	72	21	22	30	42
	Cynkowa	4,35	14	11	21	28	10	8	15	20
	Emerytalna	5,58	5	7	12	15	4	6	10	12
	Owsiana	2,70	26	41	51	70	24	37	46	64
	Panewnicka	2,73	22	25	45	56	12	13	24	29
03-08-12 18:31 2,0·10 ⁶ „Bielszowice” 17570 2040	Halembaska	0,58	77	30	51	97	59	23	39	75
	Kingi	2,70	18	19	17	31	12	13	12	22
	Dębowa	1,56	22	25	31	45	14	16	20	29
	Kochłowska	3,66	9	11	16	21	7	13	13	19
	Suchogórnica	4,03	8	12	15	21	5	7	9	12
	Panewnicka	6,11	25	33	20	46	13	17	11	24

03-08-21 13:52 8,0·10 ⁶ „Bielszowice” 17640 2140	Halembaska	0,53	80	240	68	262	62	185	52	202
	Kingi	2,67	25	30	29	49	17	21	20	34
	Dębowa	1,67	45	32	55	78	29	21	35	50
	Kochłowska	3,76	17	18	24	34	13	19	19	30
	Suchogórnica	4,15	14	12	21	28	8	7	12	16
	Cynkowa	4,94	7	5	11	14	5	4	8	10
03-08-23 6:26 8,0·10 ⁶ „Śląsk” 19500 -4320	Dębowa	5,31	48	42	71	95	31	27	46	62
	Kochłowska	3,31	155	139	167	267	122	131	131	222
	Emerytalna	2,46	45	65	74	108	38	54	62	90
	Owsiana	1,26	240	180	210	366	218	164	191	333
	Panewnicka	0,96	1000	980	590	1519	526	516	311	800
03-08-25 16:55 3,0·10 ⁷ „Bielszowice” 17580 2250	Halembaska	0,41	250	900	200	955	192	692	154	735
	Kingi	2,54	38	56	72	99	26	39	50	68
	Owsiana	6,28	18	18	10	27	16	16	9	25
	Panewnicka	6,37	29	31	16	45	15	16	8	24
03-08-28 3:09 9,0·10 ⁶ „Śląsk” 18430 -2750	Dębowa	3,45	63	51	73	109	41	33	47	70
	Kochłowska	1,41	165	155	198	301	130	156	156	256
	Suchogórnica	3,34	25	42	17	52	15	25	10	30
	Emerytalna	4,35	62	74	92	133	52	62	77	111
	Owsiana	2,02	300	98	78	325	273	89	71	296
	Panewnicka	1,89	150	550	130	585	79	289	68	308
03-09-05 1:30 7,0·10 ⁶ „Bielszowice” 17640 2260	Halembaska	0,45	56	220	49	232	43	169	38	179
	Kingi	2,58	12	11	10	19	8	8	7	13
	Dębowa	1,78	25	31	61	73	16	20	39	47
	Kochłowska	3,88	17	18	28	37	13	22	22	34
	Suchogórnica	4,25	14	18	21	31	8	11	12	18
	Cynkowa	5,03	7	8	12	16	5	6	9	11
	Owsiana	6,27	6	7	9	13	5	6	8	12
03-09-10 16:09 8,0·10 ⁶ „Bielszowice” 17630 2100	Halembaska	0,56	110	340	120	377	85	262	92	290
	Kingi	2,69	18	31	32	48	12	21	22	33
	Dębowa	1,63	41	42	49	76	26	27	32	49
	Kochłowska	3,72	15	11	20	27	12	16	16	25
	Suchogórnica	4,11	8	15	19	25	5	9	11	15
03-09-14 00:57 3,0·10 ⁶ „Halemba” 17311 -459	Halembaska	3,00	15	21	26	37	12	16	20	28
	Kingi	4,80	10	8	15	20	7	6	10	14
	Dębowa	0,97	55	82	110	148	35	53	71	95
	Kochłowska	1,19	14	18	22	32	11	17	17	27
	Suchogórnica	2,11	22	40	50	68	13	24	29	40
	Cynkowa	3,21	11	9	18	23	8	6	13	16

03-09-18 2:06 2,0·10 ⁷ „Bielszowice” 17590 2160	Halembaska	0,49	270	640	190	720	208	492	146	554
	Kingi	2,62	32	35	32	57	22	24	22	39
	Dębowa	1,68	250	560	200	645	161	361	129	416
	Kochłowska	3,78	120	132	146	231	94	115	115	188
	Suchogórnica	4,14	57	64	78	116	34	38	46	68
	Cynkowa	4,92	15	10	21	28	11	7	15	20
	Emerytalna	9,20	5	7	10	13	4	6	8	11
	Owsiana	6,20	20	21	19	35	18	19	17	32
	Panewnicka	6,28	23	28	18	40	12	15	9	21
03-09-25 14:13 1,0·10 ⁷ „Bielszowice” 17600 2210	Halembaska	0,46	200	610	130	655	154	469	100	504
	Kingi	2,59	35	38	36	63	24	26	25	43
	Dębowa	1,73	140	360	321	502	90	232	207	324
	Kochłowska	3,83	98	180	240	316	77	189	189	278
	Suchogórnica	4,19	55	62	81	116	32	36	48	68
	Emerytalna	9,24	9	4	11	15	8	3	9	12
	Owsiana	6,24	5	12	17	21	5	11	15	19
03-10-08 8:46 2,0·10 ⁷ „Bielszowice” 17650 2000	Halembaska	0,65	220	480	150	549	169	369	115	422
	Kingi	2,78	31	54	74	97	21	37	51	67
	Dębowa	1,53	230	451	180	537	148	291	116	347
	Kochłowska	3,62	124	129	142	228	98	112	112	186
	Suchogórnica	4,04	57	64	78	116	34	38	46	68
	Cynkowa	4,84	16	12	22	30	11	9	16	21
	Emerytalna	9,03	9	5	12	16	8	4	10	13
	Owsiana	6,03	18	18	10	27	16	16	9	25
	Panewnicka	6,11	19	22	16	33	10	12	8	17
03-10-08 11:01 8,0·10 ⁶ „Bielszowice” 15170 4340	Halembaska	2,78	45	38	51	78	35	29	39	60
	Kingi	0,72	56	65	62	106	39	45	43	73
	Dębowa	4,38	40	35	48	72	26	23	31	46
	Kochłowska	6,43	22	18	32	43	17	25	25	40
	Suchogórnica	5,69	26	18	30	44	15	11	18	26
	Cynkowa	5,88	12	14	16	24	9	10	11	17
03-10-15 9:20 9,0·10 ⁶ „Bielszowice” 17680 2230	Halembaska	0,50	80	380	62	393	62	292	48	302
	Kingi	2,63	25	21	27	42	17	14	19	29
	Dębowa	1,76	38	34	69	86	25	22	45	55
	Kochłowska	3,85	12	18	25	33	9	20	20	29
	Suchogórnica	4,25	14	29	20	38	8	17	12	22
	Emerytalna	9,24	13	10	9	19	11	8	8	16
	Owsiana	6,22	14	14	10	22	13	13	9	20
	Panewnicka	6,31	25	35	13	45	13	18	7	24
03-10-16 18:57 1,0·10 ⁷ „Halemba” 18315 -305	Halembaska	3,03	40	30	49	70	31	23	38	54
	Kingi	5,06	13	13	16	24	9	9	11	17
	Dębowa	1,31	56	123	110	174	36	79	71	112
	Panewnicka	3,75	86	100	82	155	45	53	43	82

03-10-17 4:23 5,0·10 ⁶ „Bielszowice” 17850 2060	Halembaska	0,74	130	440	160	486	100	338	123	374
	Kingi	2,87	26	41	40	63	18	28	28	43
	Dębowa	1,65	37	35	64	82	24	23	41	53
	Kochłowska	3,68	9	11	16	21	7	13	13	19
	Suchogórnica	4,20	10	8	14	19	6	5	8	11
03-10-24 21:09 6,0·10 ⁶ „Halemba” 17291 -442	Halembaska	2,98	17	23	31	42	13	18	24	32
	Kingi	4,78	12	10	15	22	8	7	10	15
	Dębowa	0,95	52	78	110	145	34	50	71	93
	Kochłowska	1,21	15	18	23	33	12	18	18	28
	Cynkowa	3,19	6	6	10	13	4	4	7	9
03-10-25 5:53 1,0·10 ⁷ „Halemba” 17382 -411	Halembaska	2,95	20	29	49	60	15	22	38	46
	Kingi	4,78	17	15	29	37	12	10	20	25
	Dębowa	0,93	310	580	830	1059	200	374	535	683
	Suchogórnica	2,20	26	42	54	73	15	25	32	43
	Cynkowa	3,29	39	45	34	69	28	32	24	49
	Panewnicka	4,20	24	32	28	49	13	17	15	26
03-10-29 3:36 9,0·10 ⁶ „Halemba” 18137 -432	Halembaska	3,09	33	50	42	73	25	38	32	56
	Kingi	5,09	16	23	29	40	11	16	20	28
	Dębowa	1,27	67	140	110	190	43	90	71	123
	Suchogórnica	2,89	31	65	29	78	18	38	17	46
	Cynkowa	4,01	10	21	18	29	7	15	13	21
	Panewnicka	3,73	22	31	22	44	12	16	12	23
03-10-30 12:54 9,0·10 ⁶ „Śląsk” 19500 -2940	Dębowa	4,10	63	51	73	109	41	33	47	70
	Kochłowska	2,32	165	155	198	301	130	156	156	256
	Suchogórnica	4,40	28	48	18	58	16	28	11	34
	Emerytalna	3,76	65	80	112	152	54	67	93	127
	Owsiana	0,96	120	210	78	254	109	191	71	231
	Panewnicka	0,90	990	810	1000	1624	521	426	526	855
03-11-04 6:48 4,0·10 ⁶ „Halemba” 17333 -335	Halembaska	2,88	21	17	23	35	16	13	18	27
	Kingi	4,69	12	10	16	22	8	7	11	15
	Dębowa	0,85	63	100	110	161	41	65	71	104
	Kochłowska	1,19	30	40	71	87	18	24	42	51
	Suchogórnica	2,19	27	39	61	77	16	23	36	45
03-11-07 19:12 1,0·10 ⁶ „Bielszowice” 17700 1970	Halembaska	0,71	70	120	96	169	54	92	74	130
	Kingi	2,83	21	25	31	45	14	17	21	31
	Dębowa	1,52	21	28	34	49	14	18	22	31
	Kochłowska	3,59	10	11	17	23	8	13	13	21
	Suchogórnica	4,04	9	8	15	19	5	5	9	11

03-11-08 23:01 8,0·10 ⁷ „Bielszowice” 17670 2230	Halembaska	0,49	320	830	400	975	246	638	308	750
	Kingi	2,62	61	98	95	134	48	68	66	112
	Dębowa	1,76	55	100	105	150	40	57	68	101
	Kochłowska	3,85	16	18	20	32	13	17	17	27
	Suchogórnica	4,24	12	11	9	19	7	6	5	11
	Cynkowa	5,02	6	9	12	16	4	6	9	12
	Emerytalna	9,24	19	12	13	26	16	10	11	22
	Panewnicka	6,31	50	54	30	79	26	28	16	42
03-11-17 6:29 1,0·10 ⁶ „Halemba” 18260 -315	Halembaska	3,02	11	13	17	24	8	10	13	19
	Kingi	5,04	12	10	14	21	8	7	10	14
	Dębowa	1,27	48	56	98	123	31	36	63	79
	Kochłowska	1,46	12	17	21	30	9	17	17	25
	Suchogórnica	3,05	10	36	11	39	6	21	6	23
	Cynkowa	4,16	4	6	10	12	3	4	7	9
	Panewnicka	3,77	21	30	23	43	11	16	12	23
03-11-25 00:03 9,0·10 ⁶ „Halemba” 17287 -386	Halembaska	2,93	64	88	120	162	49	68	92	125
	Kingi	4,73	14	13	20	28	10	9	14	19
	Dębowa	0,90	220	240	290	436	142	155	187	281
	Suchogórnica	2,12	30	40	71	87	18	24	42	51
	Cynkowa	3,21	32	38	34	60	23	27	24	43
	Panewnicka	4,28	29	35	28	53	15	18	15	28
03-12-01 00:55 2,0·10 ⁶ „Halemba” 19401 -1012	Halembaska	4,13	11	12	24	29	8	9	18	22
	Kingi	6,24	9	10	19	23	6	7	13	16
	Dębowa	2,60	38	24	27	52	25	15	17	34
	Emerytalna	5,66	14	12	19	26	12	10	16	22
	Panewnicka	2,68	16	24	27	40	8	13	14	21
03-12-04 7:04 9,0·10 ⁶ „Bielszowice” 17810 2260	Halembaska	0,60	85	370	120	398	65	285	92	306
	Kingi	2,70	16	18	14	28	11	12	10	19
	Dębowa	1,83	75	55	85	126	48	35	55	81
	Kochłowska	3,88	18	18	34	42	14	27	27	40
	Suchogórnica	4,34	12	18	22	31	7	11	13	18
	Cynkowa	5,14	6	9	12	16	4	6	9	12
	Owsiana	6,19	12	11	15	22	11	10	14	20
	Panewnicka	6,29	23	18	13	32	12	9	7	17
03-12-09 22:12 2,0·10 ⁷ „Bielszowice” 17690 2080	Halembaska	0,61	180	470	230	553	138	362	177	426
	Kingi	2,74	40	41	37	68	28	28	26	47
	Dębowa	1,62	145	220	350	438	94	142	226	283
	Kochłowska	3,70	110	176	210	295	87	165	165	249
	Suchogórnica	4,13	56	62	95	127	33	36	56	74
	Emerytalna	9,09	9	4	16	19	8	3	13	16
	Panewnicka	6,17	35	43	24	60	18	23	13	32

03-12-16 7:48 3,0·10 ⁶ „Halemba” 17281 -401	Halembaska	2,94	11	10	18	23	8	8	14	18
	Kingi	4,74	16	14	21	30	11	10	14	21
	Dębowa	0,91	83	230	250	350	54	148	161	226
	Suchogórnica	2,11	28	40	71	86	16	24	42	51
	Cynkowa	3,20	28	35	35	57	20	25	25	41
03-12-18 5:22 8,0·10 ⁶ „Halemba” 17301 -313	Halembaska	2,85	81	92	110	165	62	71	85	127
	Kingi	4,66	13	21	27	37	9	14	19	25
	Dębowa	0,82	146	171	221	315	94	110	143	203
	Kochłowska	1,33	17	18	25	35	13	20	20	31
	Suchogórnica	2,17	25	40	55	72	15	24	32	43
	Cynkowa	3,25	11	12	20	26	8	9	14	18
	Emerytalna	7,03	7	16	9	20	6	13	8	16
04-01-10 4:16 4,0·10 ⁷ „Halemba” 17282 -261	Panewnicka	4,33	26	35	19	48	14	18	10	25
	Halembaska	2,80	60	72	100	137	46	55	77	105
	Kingi	4,61	18	28	23	40	12	19	16	28
	Dębowa	0,77	240	880	220	938	155	568	142	605
	Kochłowska	1,39	76	150	78	185	49	97	50	120
	Suchogórnica	2,18	20	12	49	54	12	7	29	32
	Cynkowa	3,25	39	45	34	69	28	32	24	49
	Emerytalna	7,09	10	15	15	23	8	13	13	20
04-01-15 20:55 7,0·10 ⁶ „Halemba” 17312 -228	Panewnicka	4,38	11	13	20	42	9	15	14	22
	Halembaska	2,77	12	17	21	30	9	13	16	23
	Kingi	4,58	7	9	14	18	5	6	10	12
	Dębowa	0,74	56	68	98	132	36	44	63	85
	Kochłowska	1,41	48	38	54	82	38	43	43	71
	Suchogórnica	2,22	0	36	11	38	0	21	6	22
04-01-20 14:24 5,0·10 ⁶ „Bielszowice” 16230 1800	Cynkowa	3,29	6	5	10	13	4	4	7	9
	Halembaska	1,29	19	52	30	63	15	40	23	48
	Kingi	2,35	19	10	25	33	13	7	17	23
	Dębowa	1,67	27	29	38	55	17	19	25	35
	Kochłowska	3,68	18	18	22	34	14	17	17	28
	Suchogórnica	3,26	26	14	23	37	15	8	14	22
04-01-22 7:01 9,0·10 ⁷ „Halemba” 17655 -122	Cynkowa	3,81	7	8	9	14	5	6	6	10
	Halembaska	2,69	67	54	97	130	52	42	75	100
	Kingi	4,61	16	26	24	39	11	18	17	27
	Dębowa	0,73	380	254	321	559	245	164	207	360
	Kochłowska	1,49	190	290	350	493	150	276	276	417
	Suchogórnica	2,57	28	46	36	65	16	27	21	38
	Cynkowa	3,65	18	22	29	41	13	16	21	29
	Emerytalna	7,05	5	11	16	20	4	9	13	17
	Panewnicka	4,26	44	63	31	83	23	33	16	44

04-01-27 22:45 2,0·10 ⁶ „Halemba” 18221 -319	Halembaska	3,01	14	31	17	38	11	24	13	29
	Kingi	5,03	10	10	18	23	7	7	12	16
	Dębowa	1,25	43	56	87	112	28	36	56	72
	Kochłowska	1,44	41	50	76	100	32	60	60	91
	Suchogórnica	3,01	8	32	16	37	5	19	9	22
	Cynkowa	4,12	5	6	11	13	4	4	8	10
	Panewnicka	3,78	21	30	23	43	11	16	12	23
04-01-30 23:59 7,0·10 ⁶ „Bielszowice” 17780 2150	Halembaska	0,63	123	128	132	221	95	98	102	170
	Kingi	2,76	12	16	24	31	8	11	17	22
	Dębowa	1,71	29	35	64	78	19	23	41	51
	Kochłowska	3,77	15	18	28	37	12	22	22	33
	Suchogórnica	4,23	10	18	19	28	6	11	11	16
	Cynkowa	5,04	5	9	10	14	4	6	7	10
	Emerytalna	9,13	22	25	31	45	20	23	28	41
04-02-06 12:26 2,0·10 ⁶ „Bielszowice” 16000 1710	Halembaska	1,53	56	82	82	129	43	63	63	99
	Kingi	2,41	16	10	23	30	11	7	16	21
	Dębowa	1,76	36	40	46	71	28	31	35	54
	Kochłowska	3,69	16	17	23	33	13	18	18	29
	Suchogórnica	3,12	12	14	23	29	7	8	14	17
	Cynkowa	3,62	42	30	34	62	30	21	24	44
04-02-06 12:26 6,0·10 ⁵ „Bielszowice” 16010 1840	Halembaska	1,45	20	40	20	49	15	31	15	38
	Kingi	2,28		9	31	32	0	6	21	22
	Dębowa	1,85	21	15	28	38	14	10	18	25
	Kochłowska	3,80	14	16	19	29	11	15	15	24
	Suchogórnica	3,25	10	12	21	26	6	7	12	15
04-02-19 17:37 8,0·10 ⁶ „Bielszowice” 17850 2090	Halembaska	0,72	77	110	70	151	59	85	54	116
	Kingi	2,85	12	15	17	26	8	10	12	18
	Dębowa	1,68	49	67	98	128	32	43	63	83
	Kochłowska	3,71	25	24	36	50	20	28	28	45
	Panewnicka	6,12	16	21	28	38	8	11	15	20
04-03-02 18:38 7,0·10 ⁵ „Halemba” 17291 -30	Halembaska	2,57	13	10	12	20	10	8	9	16
	Kingi	4,39	8	6	9	13	6	4	6	9
	Dębowa	0,54	55	82	110	148	35	53	71	95
	Kochłowska	1,61	10	8	11	17	8	9	9	15
	Suchogórnica	2,31	8	9	12	17	5	5	7	10
04-03-10 5:44 5,0·10 ⁷ „Bielszowice” 17790 2240	Halembaska	0,59	110	320	100	353	85	246	77	271
	Kingi	2,70	29	41	42	65	20	28	29	45
	Dębowa	1,80	67	140	110	190	43	90	71	123
	Kochłowska	3,86	22	31	47	60	17	37	37	55
	Suchogórnica	4,31	25	24	36	50	15	14	21	29
	Cynkowa	5,11	6	11	8	15	4	8	6	11
	Panewnicka	6,28	14	12	8	20	7	6	4	11

04-03-13 2:12 9,0·10 ⁶ „Halemba” 17342 -138	Halembaska	2,68	68	58	82	121	52	45	63	93
	Kingi	4,51	45	34	46	73	31	23	32	50
	Dębowa	0,65	146	132	151	248	94	85	97	160
	Kochłowska	1,50	39	42	53	78	31	42	42	67
	Suchogórnica	2,29	21	44	74	89	12	26	44	52
	Cynkowa	3,35	19	31	24	44	14	22	17	31
	Panewnicka	4,43	18	26	18	36	9	14	9	19
04-03-20 4:11 9,0·10 ⁶ „Bielszowice” 17850 2290	Halembaska	0,62	160	400	260	503	123	308	200	387
	Kingi	2,71	32	35	30	56	22	24	21	39
	Dębowa	1,87	121	114	132	212	78	74	85	137
	Suchogórnica	4,39	8	12	14	20	5	7	8	12
	Panewnicka	6,30	16	21	22	34	8	11	12	18
04-03-24 4:12 8,0·10 ⁶ „Halemba” 17183 88	Halembaska	2,45	34	42	64	84	26	32	49	64
	Kingi	4,24	36	42	59	81	25	29	41	56
	Dębowa	0,44	81	102	290	318	52	66	187	205
	Kochłowska	1,75	12	16	15	25	9	11	11	18
	Suchogórnica	2,29	21	28	43	55	12	16	25	33
	Emerytalna	7,44	12	12	15	23	10	10	13	19
04-03-29 8:10 8,0·10 ⁷ „Bielszowice” 17770 2310	Halembaska	0,54	93	170	120	228	72	131	92	175
	Kingi	2,64	36	33	37	61	25	23	26	42
	Dębowa	1,86	65	98	110	161	42	63	71	104
	Kochłowska	3,93	18	21	23	36	14	18	18	29
	Suchogórnica	4,36	11	14	14	23	6	8	8	13
	Emerytalna	9,29	8	13	10	18	7	11	8	15
	Panewnicka	6,35	14	17	16	27	7	9	8	14
04-04-09 5:54 2,0·10 ⁶ „Halemba” 17296 -156	Halembaska	2,70	56	53	87	116	43	41	67	89
	Kingi	4,51	14	24	25	37	10	17	17	26
	Dębowa	0,67	59	89	190	218	38	57	123	141
	Kochłowska	1,49	31	81	48	99	24	38	38	59
04-04-16 19:19 9,0·10 ⁵ „Halemba” 17256 -171	Halembaska	2,71	42	38	52	77	32	29	40	59
	Kingi	4,51	11	21	19	30	8	14	13	21
	Dębowa	0,68	98	121	132	204	63	78	85	132
	Kochłowska	1,48	30	69	41	86	24	32	32	51
04-04-23 4:24 1,0·10 ⁶ „Bielszowice” 15420 3810	Halembaska	2,26	57	42	49	86	44	32	38	66
	Kingi	0,53	102	98	130	192	70	68	90	132
	Dębowa	3,79	21	15	19	32	14	10	12	21
	Kochłowska	5,84	8	12		14	6	0	0	6
	Suchogórnica	5,16	7	8	10	15	4	5	6	9
	Cynkowa	5,40	8	18	11	23	6	13	8	16

04-04-29 23:23 8,0·10 ⁵ „Halemba” 17315 157	Halembaska	2,38	43	39	51	77	33	30	39	59
	Kingi	4,22	32	38	36	61	22	26	25	42
	Dębowa	0,35	93	76	160	200	60	49	103	129
	Kochłowska	1,79	38	40	39	68	30	31	31	53
	Cynkowa	3,45	7	11	9	16	5	8	6	11
04-05-11 17:44 5,0·10 ⁶ „Halemba” 17524 36	Halembaska	2,52	48	46	52	84	37	35	40	65
	Kingi	4,41	25	28	32	49	17	19	22	34
	Dębowa	0,53	97	120	380	410	63	77	245	265
	Kochłowska	1,65	58	68	123	152	46	97	97	144
	Cynkowa	3,59	7	13	14	20	5	9	10	15
04-05-19 8:22 4,0·10 ⁶ „Halemba” 17482 88	Halembaska	2,46	43	41	48	76	33	32	37	59
	Kingi	4,35	23	20	29	42	16	14	20	29
	Dębowa	0,46	79	99	310	335	51	64	200	216
	Kochłowska	1,71	36	42	59	81	28	46	46	72
	Suchogórnica	3,57	9	14	14	22	6	10	10	16
04-05-22 7:26 5,0·10 ⁶ „Halemba” 17750 -50	Halembaska	2,63	48	39	66	90	37	30	51	70
	Kingi	4,58	16	26	24	39	11	18	17	27
	Dębowa	0,72	82	120	330	361	53	77	213	233
	Kochłowska	1,57	30	80	44	96	24	35	35	54
	Suchogórnica	2,69	5	12	17	21	4	9	12	15
	Cynkowa	3,76	10	13	11	20	7	9	8	14
	Panewnicka	4,26	12	16	11	23	6	8	6	12
04-05-31 22:57 1,0·10 ⁶ „Halemba” 17502 -51	Halembaska	2,60	35	32	55	73	27	25	42	56
	Kingi	4,48	17	19	17	31	12	13	12	21
	Dębowa	0,60	101	124	136	210	65	80	88	135
	Kochłowska	1,57	52	35	80	102	41	63	63	98
	Cynkowa	3,53	12	10	11	19	9	7	8	14
04-07-19 19:59 2,0·10 ⁷ „Halemba” 19425 -960	Halembaska	4,10	22	30	62	72	17	23	48	56
	Kingi	6,21	10	8	12	18	7	6	8	12
	Dębowa	2,59	89	67	121	164	57	43	78	106
	Kochłowska	1,95	125	210	132	278	98	104	104	177
	Suchogórnica	4,05	18	28	54	63	11	16	32	37
	Owsiana	2,60	78	82	122	166	71	75	111	151
04-08-27 9:23 8,0·10 ⁵ „Halemba” 17280 -240	Halembaska	2,78	17	16	19	30	13	12	15	23
	Kingi	4,58	12	15	14	24	8	10	10	16
	Dębowa	0,75	56	68	71	113	36	44	46	73
	Kochłowska	1,41	32	26	38	56	25	30	30	49
	Suchogórnica	2,19	22	19	27	40	13	11	16	23
	Cynkowa	3,25	16	14	15	26	11	10	11	19

04-09-09 20:30 $3,0 \cdot 10^7$ „Halemba” 17447 -1051	Halembaska	3,59	47	51	85	110	36	39	65	84
	Kingi	5,41	14	21	21	33	10	14	14	23
	Dębowa	1,57	53	91	210	235	34	59	135	152
	Kochłowska	0,58	150	120	190	270	118	150	150	242
	Suchogórnica	2,07	21	52	26	62	12	31	15	36
	Cynkowa	3,21	15	18	15	28	11	13	11	20
	Owsiana	3,73	7	8	5	12	6	7	5	11
04-10-09 5:53 $1,0 \cdot 10^6$ „Bielszowice” 16390 1700	Halembaska	1,23	15	49	32	60	12	38	25	46
	Kingi	2,48	15	10	22	28	10	7	15	20
	Dębowa	1,49	25	38	51	68	16	25	33	44
	Kochłowska	3,53	15	16	21	30	12	17	17	26
	Suchogórnica	3,21	16	21	22	34	9	12	13	20
	Cynkowa	3,81	10	7	16	20	7	5	11	14
04-11-26 $2,0 \cdot 10^6$ „Bielszowice” 17000 4000	Halembaska	1,49	43	45	61	87	33	35	47	67
	Kingi	1,16	42	47	58	86	29	32	40	59
	Dębowa	3,50	14	11	17	25	9	7	11	16
	Kochłowska	5,65	6	7	9	13	5	7	7	11
	Suchogórnica	5,58	8	5	8	12	5	3	5	7

Przykładową rejestrację przyspieszeń drgań w formie akcelerogramów na kilku stanowiskach sejsmometrycznych wraz z ich widmem amplitudowym przedstawiono na rysunku 3.2 dla wysokoenergetycznego wstrząsu z dnia 24.07.2003 roku o energii sejsmicznej $E = 8,0 \cdot 10^7$ J.

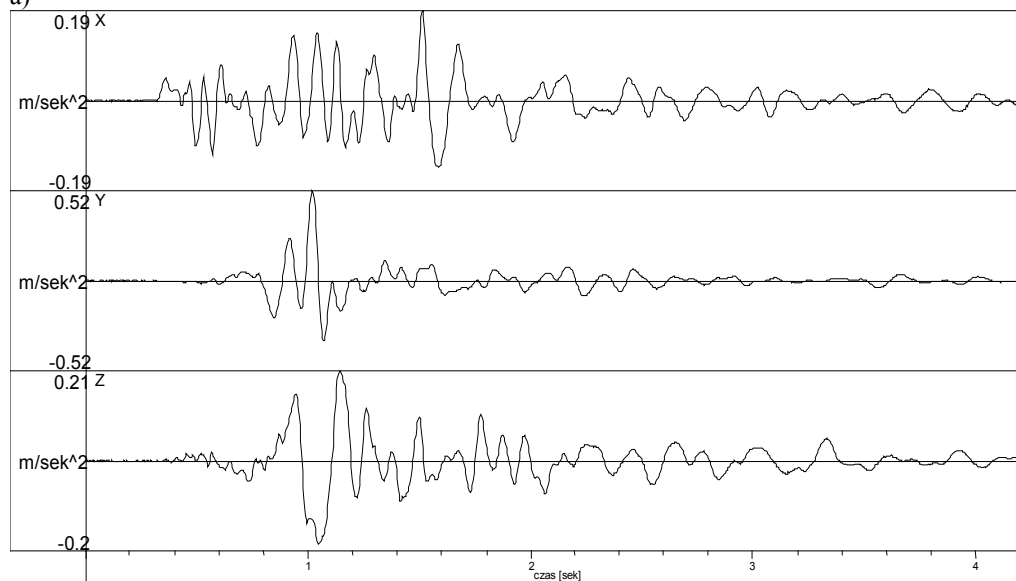
Każdy z zarejestrowanych wstrząsów poddano interpretacji w celu określenia rozkładu przyspieszenia drgań bezpośrednio pomierzonych na powierzchniowych stanowiskach sejsmometrycznych oraz rozkładu przyspieszenia drgań zredukowanego przez uwzględnienie współczynnika amplifikacji drgań przez przypowierzchniową warstwę gruntu.

Analizując uzyskane rozkłady izolinii przyspieszenia drgań stwierdzono, że we wszystkich przypadkach nie były one symetryczne i regularne względem ogniska wstrząsu. Nawet po uwzględnieniu rozkładu współczynnika amplifikacji drgań izolinie te nie wykazywały przebiegu kołowego. Fakt ten jednoznacznie świadczy o istnieniu dodatkowego czynnika, oprócz niejednorodnej budowy warstw nadkładu, który wpływa w sposób istotny na efekt sejsmiczny obserwowany na powierzchni.

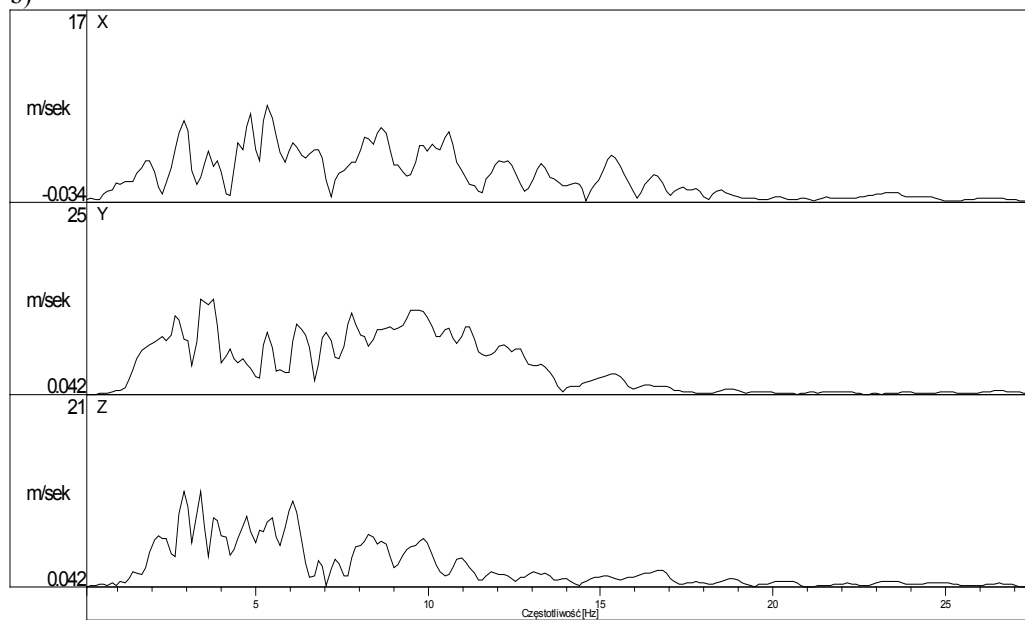
Przykładowy rozkład izolinii wypadkowych przyspieszeń zarejestrowanych bezpośrednio na stanowiskach sejsmometrycznych oraz izolinii tych przyspieszeń z uwzględnieniem zjawiska amplifikacji drgań przedstawiono na rysunku 3.3.

Kopalnia „Bielszowice” – ul. Halembaska

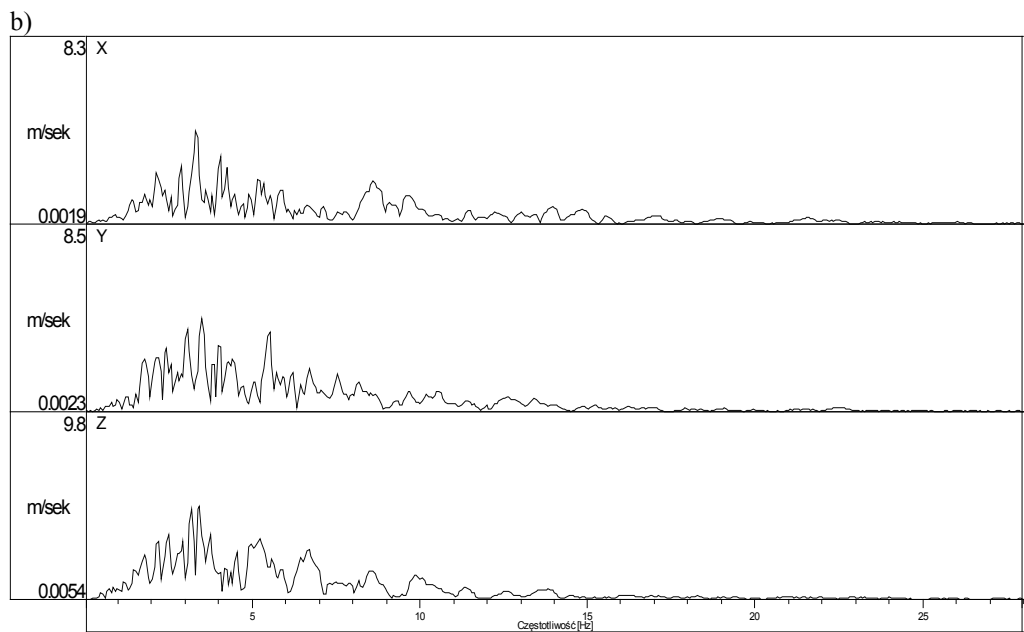
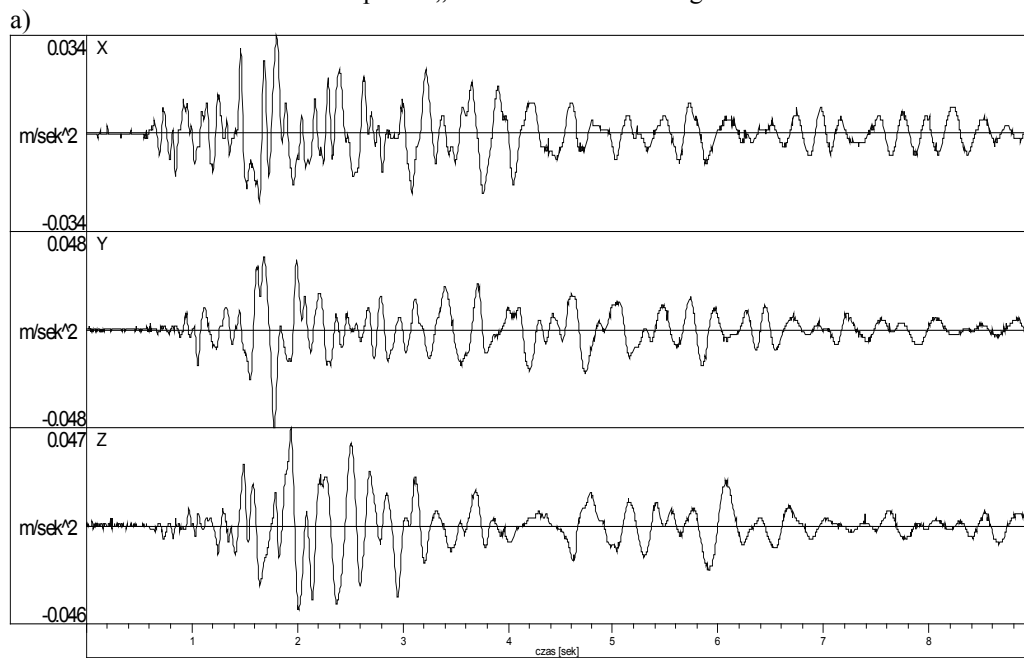
a)



b)

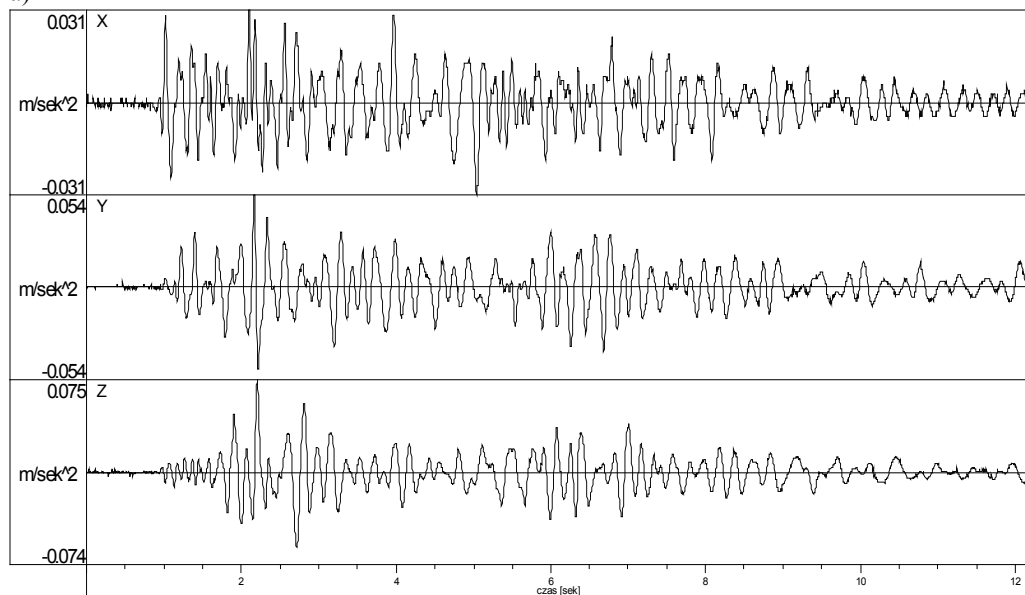


Kopalnia „Bielszowice” – ul. Kingi

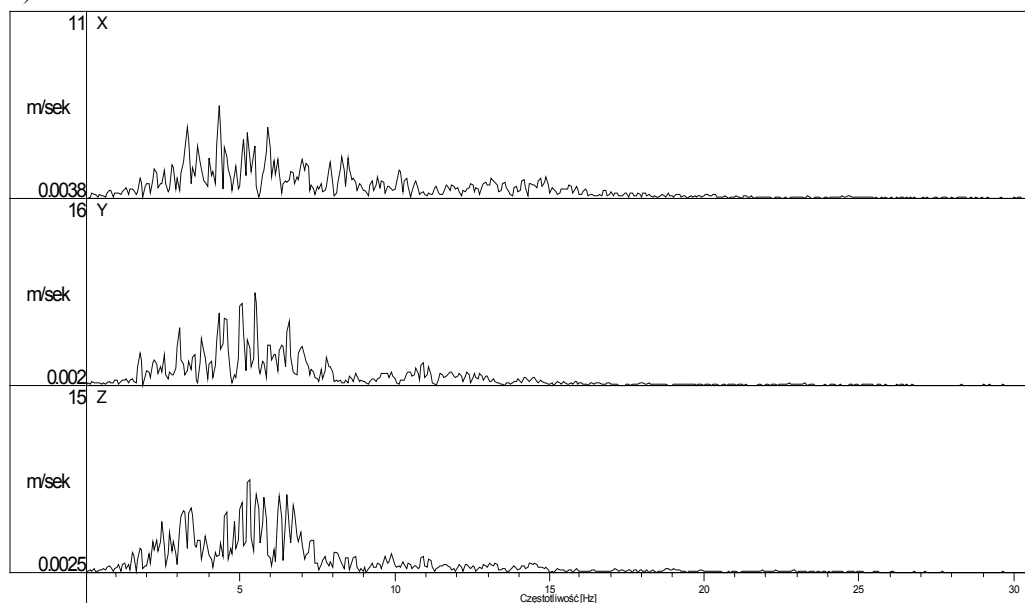


Kopalnia „Halemba” – ul. Dębowa

a)

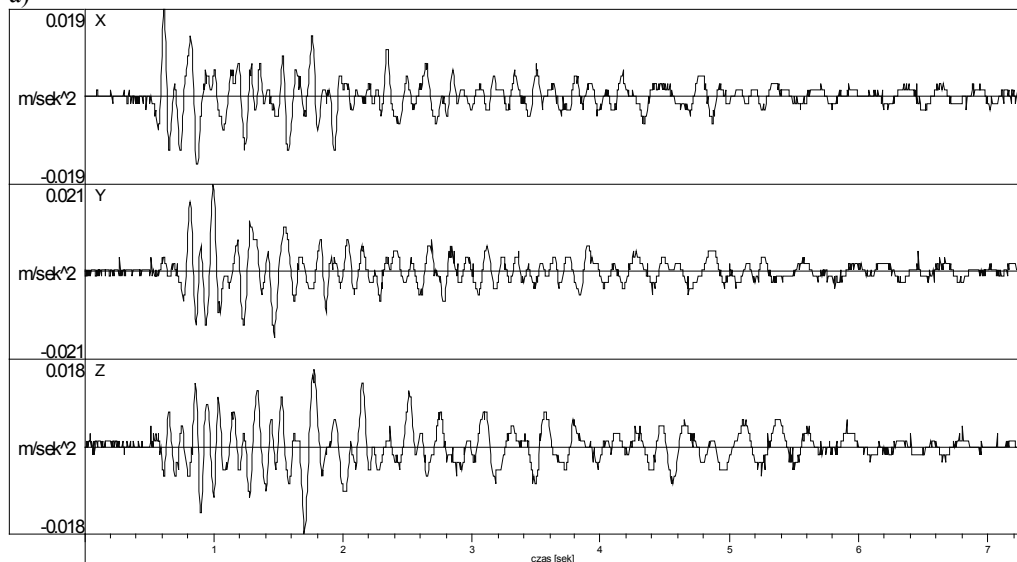


b)

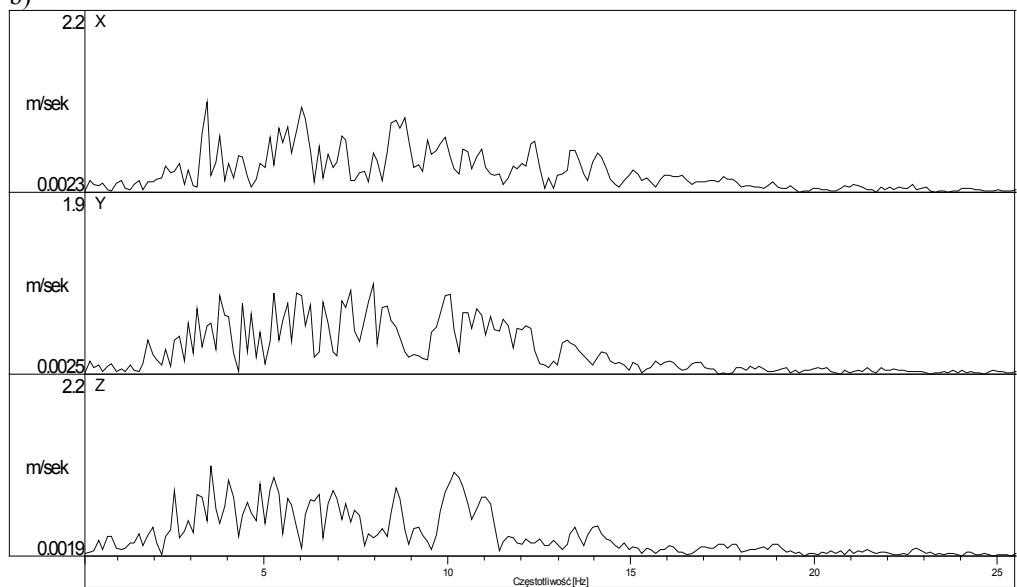


Kopalnia „Halemba” – ul. Kochłowska

a)

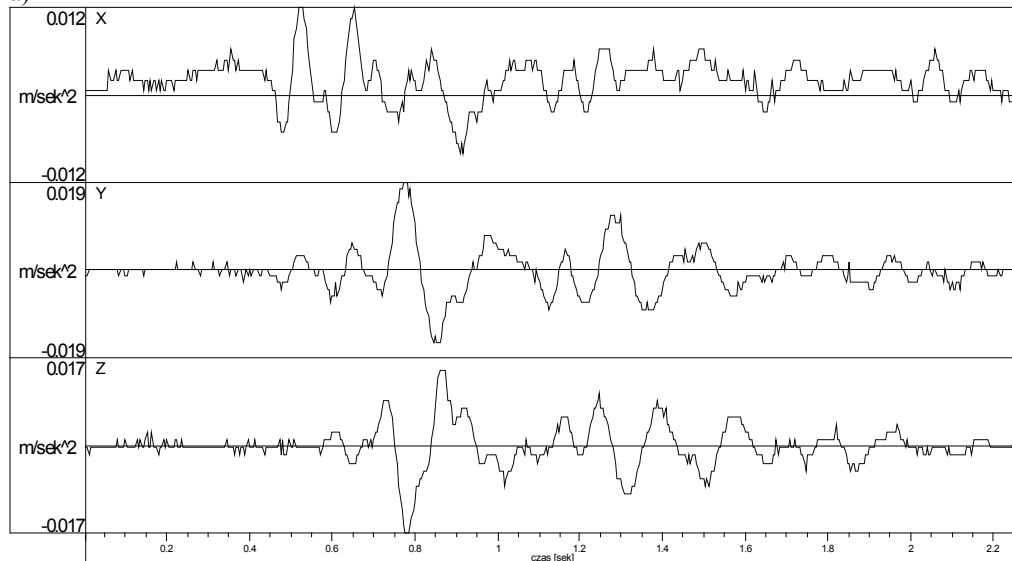


b)

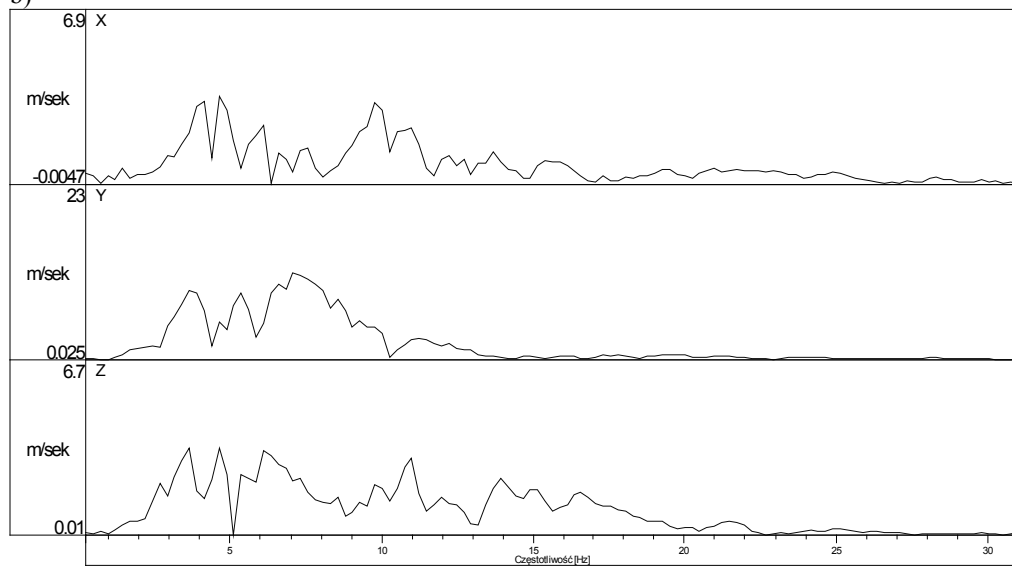


Kopalnia „Polska-Wirek” – ul. Suchogórnicza

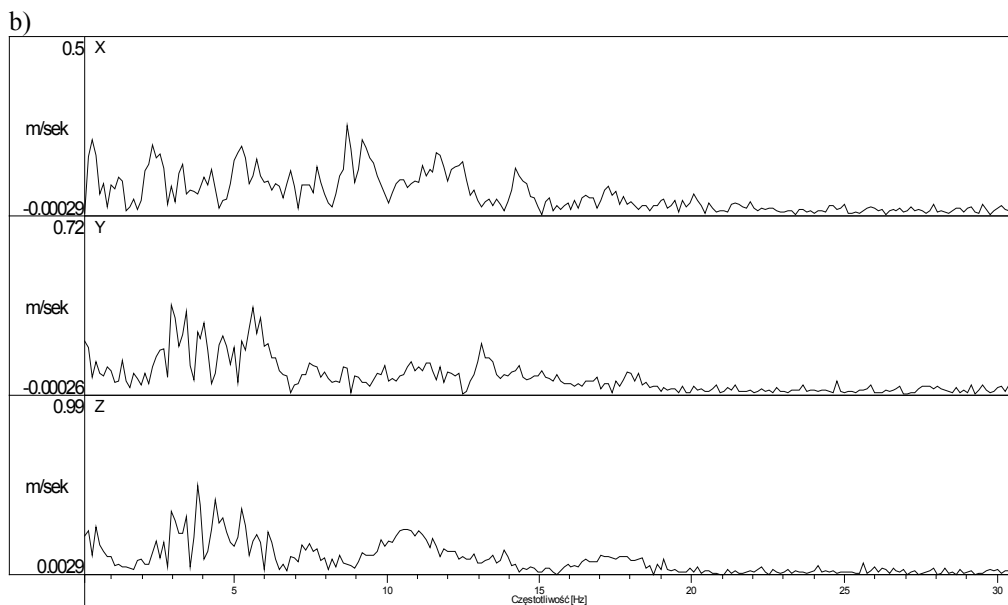
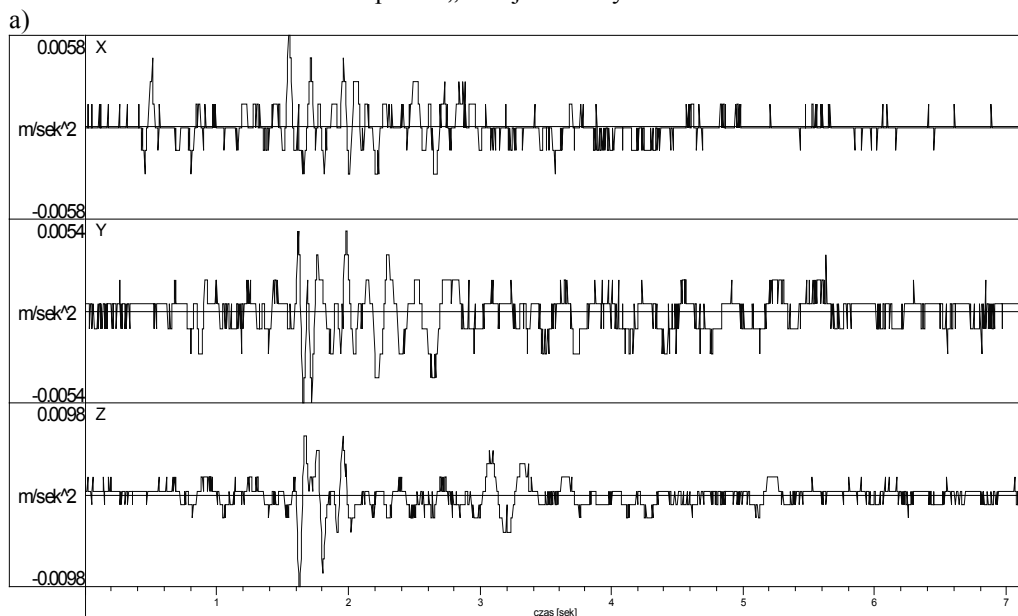
a)



b)

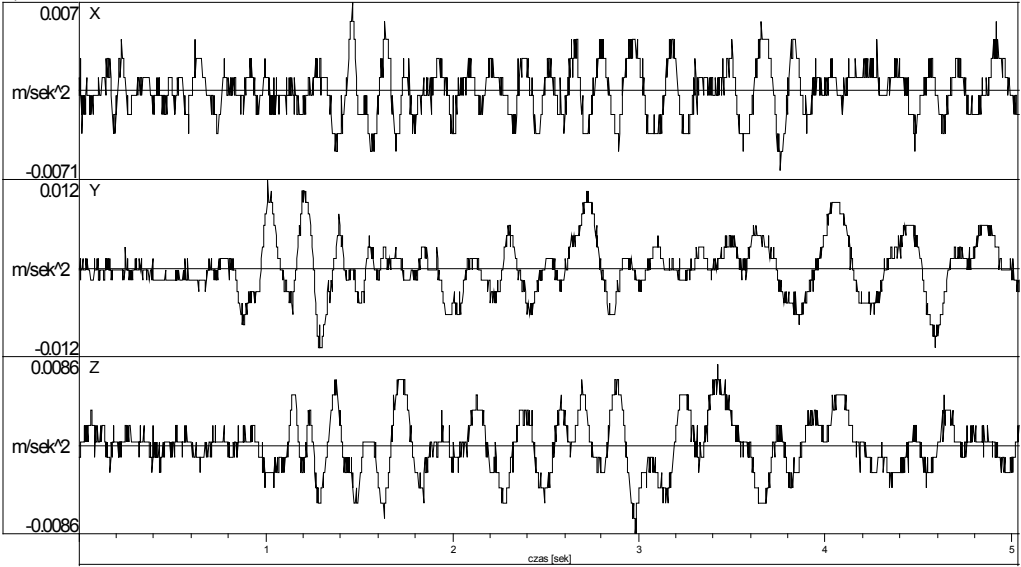


Kopalnia „Pokój” – ul. Cynkowa

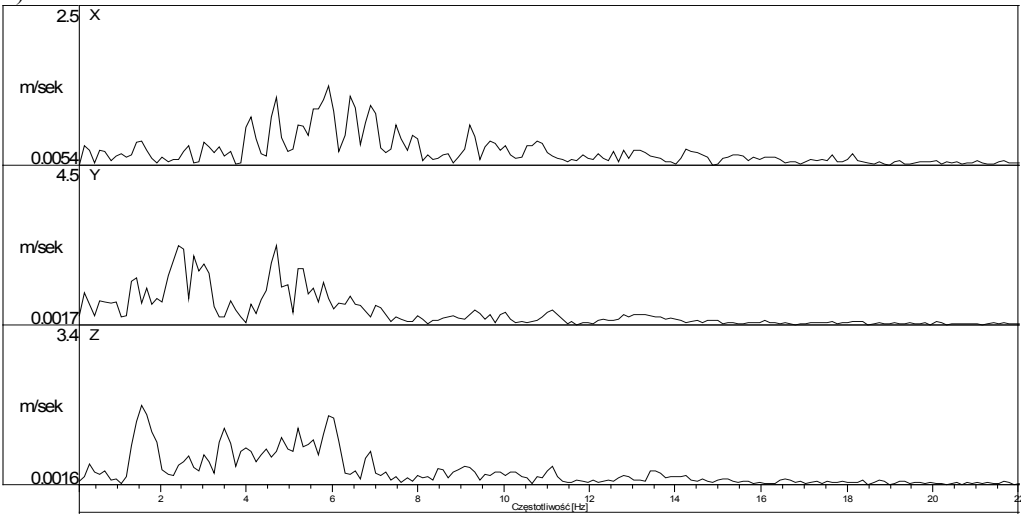


Kopalnia „Śląsk” – ul. Emerytalna

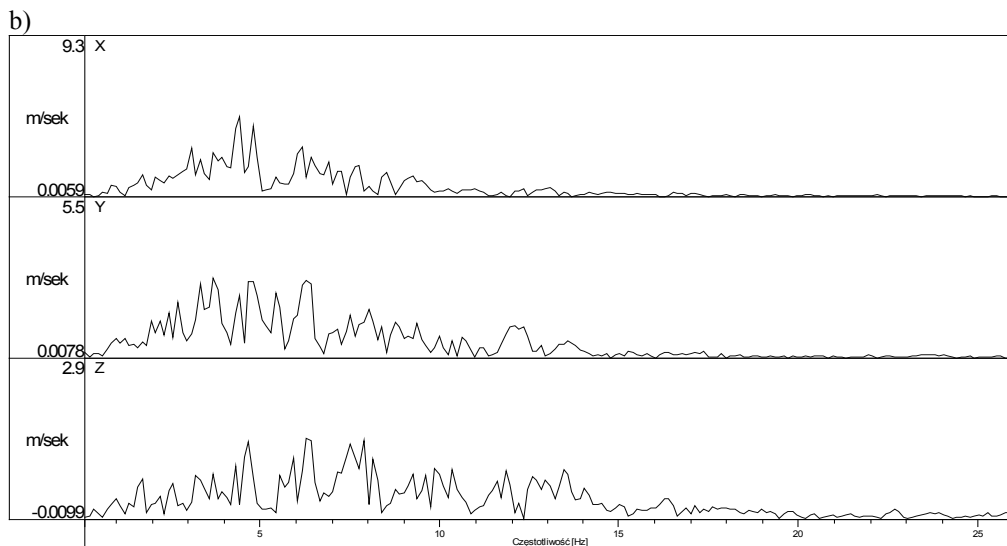
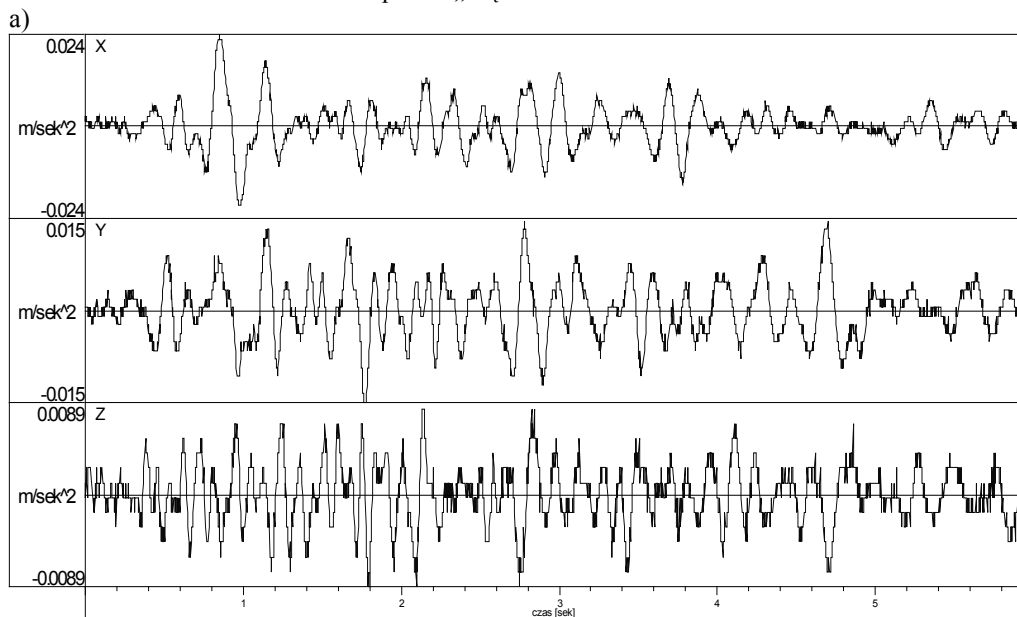
a)



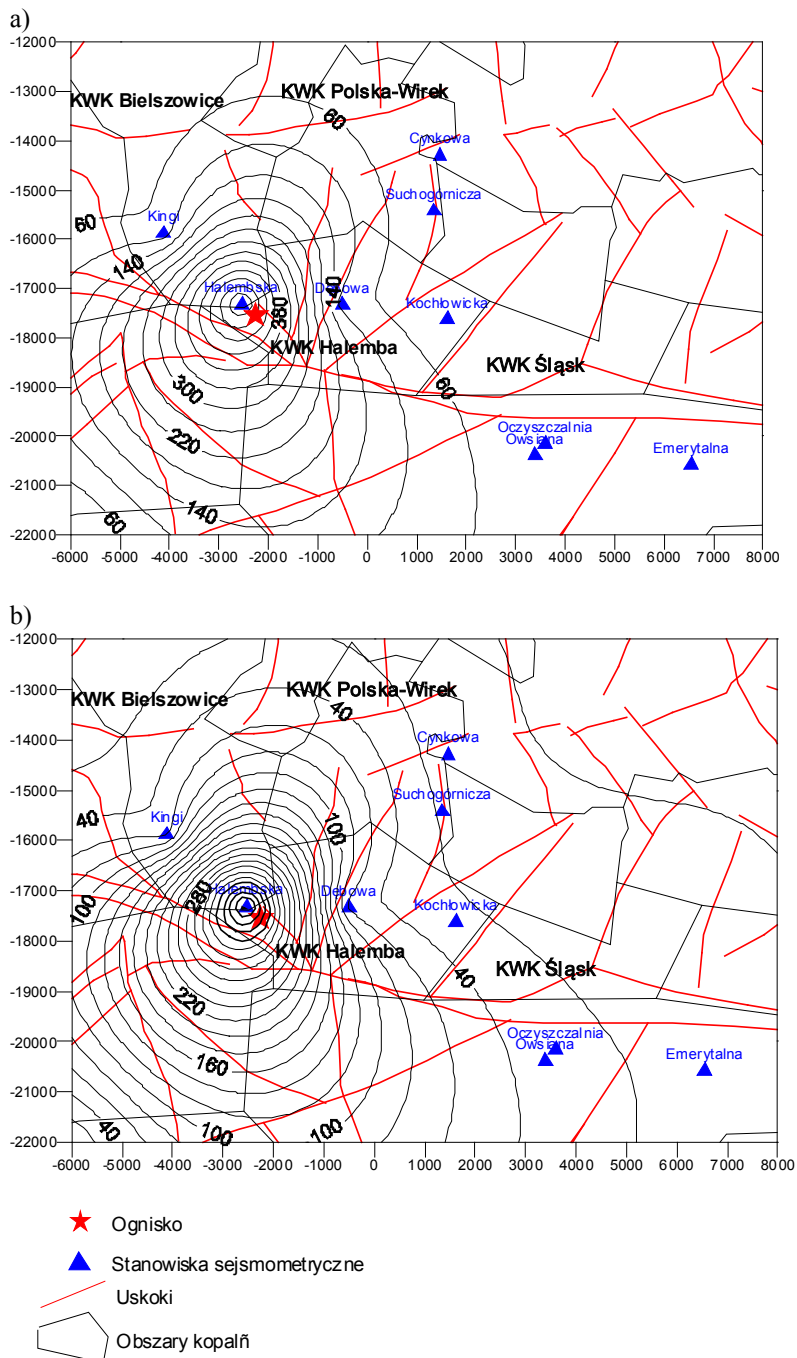
b)



Kopalnia „Śląsk” – ul. Owsiana



Rys. 3.2. Rejestracje wstrząsu o energii sejsmicznej $8 \cdot 10^7$ J z dnia 24.07.2003 r. na poszczególnych powierzchniowych stanowiskach sejsmometrycznych: a – akceleroqram, b – widmo amplitudowe



Rys. 3.3. Mapa izolinii wypadkowych przyspieszeń drgań gruntu dla wstrząsu o energii sejsmicznej $8 \cdot 10^7$ J z dnia 24.07.2003 roku: a – przyspieszenia drgań pomierzone, b – przyspieszenia drgań z uwzględnieniem amplifikacji

3.2. Pomiary sejsmometryczne w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym

Obserwacje drgań powierzchni, wywoływanych wstrząsami górnictwymi występującymi w kopalniach rud miedzi w LGOM, były prowadzone na kilkunastu powierzchniowych stanowiskach sejsmometrycznych wyposażonych w cyfrową aparaturę rejestrującą przyspieszenia drgań gruntu w paśmie częstotliwości 0,5–1000 Hz. Stosowane były dwa typy aparatury pomiarowej o podobnych parametrach technicznych. Aparatura składała się z trójskładowych czujników drgań umieszczonych w gruncie oraz modułu zapisującego. Zestawienie stanowisk pomiarowych przedstawiono w tablicy 3.3, a ich usytuowanie w rejonie badań na rysunku 3.4.

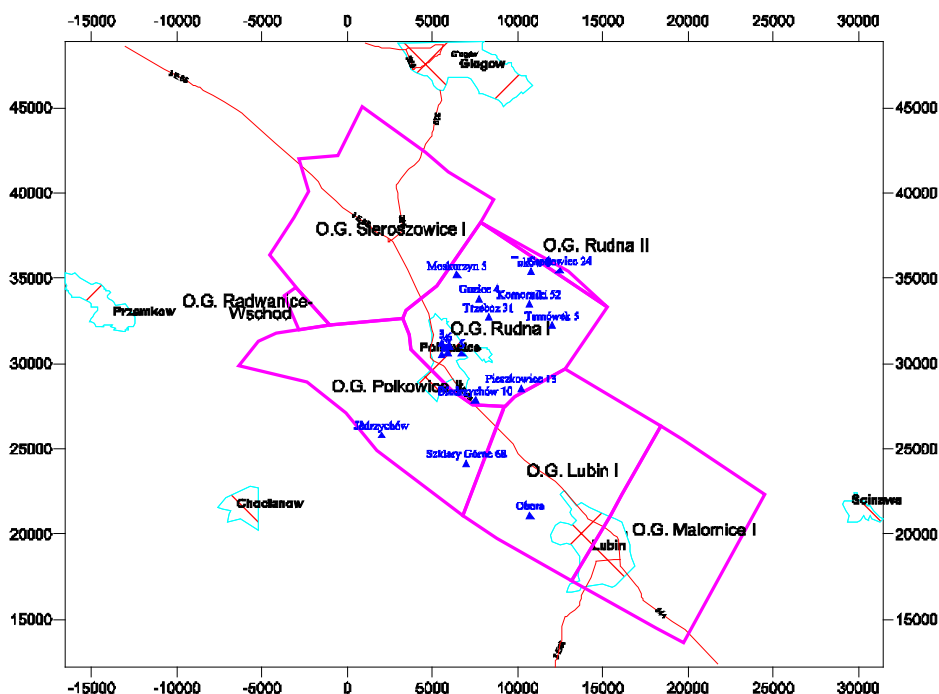
Tablica 3.3. Powierzchniowe stanowiska sejsmometryczne

Rejon badań	Typ aparatury	Współrzędne stanowiska (układ lokalny)		
		X, m	Y, m	Z, m
ul. Hubala	AMAX	30450	5570	182
ul. Kolejowa	AMAX	30950	5980	180
ul. 3 Maja	WORS	31129,5	5549,5	180
ul. Sosnowa	WORS	30531,5	6717,5	181
ul. Miedziana	WORS	39864	5756	181
ul. Akacjowa	WORS	30578	5882	186
Szklary Górne	WORS	24110	6990	178
Biedrzychów	WORS	27787	7499	174
Grodowiec	WORS	35393	12450	136
Guzice	WORS	33765	7731	135
Komorniki	WORS	33453	10671	119
Moskorzyn	WORS	35128	6430	130
Pieszkowice	WORS	28511	10200	201
Tarnówek	WORS	32192	12006	126
Żuków	WORS	35346	10799	99
Trzebcz	WORS	32672	8284	150

Zestawienie wyników rejestracji sejsmometrycznych oraz danych sejsmologicznych, charakteryzujących poszczególne wstrząsy, zawiera tablica 3.4.

Łącznie przeanalizowano 40 silnych wstrząsów o energii sejsmicznej $\dot{E} \geq 10^7$ J, które wystąpiły w obszarze LGOM. Na rysunku 3.5 dla jednego z powyższych wstrząsów, a mianowicie z dnia 2.09.2004 roku o energii sejsmicznej $2 \cdot 10^9$ J, przedstawiono akcelerogramy zarejestrowane przez powierzchniowe stanowiska sejsmometryczne oraz ich widma amplitudowe. Generalnie wielkości zarejestrowanych amplitud przyspieszeń, co potwierdzają wyniki zamieszczone w tablicy 3.4, są bardzo zróżnicowane w zależności od wstrząsu oraz położenia stanowiska pomiarowego. Wynoszą one od kilkunastu aż do 3000 mm/s².

Z kolei na rysunku 3.6 przedstawiono mapy rozkładu izolinii przyspieszeń drgań pomierzonych oraz zredukowanych o współczynnik amplifikacji. Przebiegi izolinii zarówno dla danych uzyskanych bezpośrednio z rejestracji, jak i zredukowanych o współczynnik amplifikacji są nieregularne, co jednoznacznie, podobnie jak w przypadku wyników uzyskanych na poligonie pomiarowym w GZW, świadczy o wpływie dodatkowych czynników zaburzających kołowy i symetryczny względem epicentrum wstrząsu rozkład izolinii przyspieszenia drgań gruntu.



Rys. 3.4. Lokalizacja powierzchniowych stanowisk sejsmicznych w LGOM

Tablica 3.4. Przyspieszenia drgań gruntu dla wstrząsów, jakie wystąpiły w ZG „Rudna”

Data Czas Energia, J X, m Y, m	Rejon badań	Odległość epicentralna d , km	Przyspieszenia pomierzone mm/s^2				Przyspieszenia po redukcji uwzględniającej wartość amplifikacji W_t , mm/s^2			
			a_{px}	a_{py}	a_{pz}	a_{pwyp}	a_{zx}	a_{zy}	a_{zz}	a_{zwyp}
13.02.01 15:27 $7,1 \cdot 10^7$ 29750 6201	ul. Hubala	0,9	300	200	300	469	214	143	214	335
	ul. 3 Maja	1,5	470	340	480	753	392	283	400	627
	ul. Sosnowa	0,9	410	430	520	790	228	239	289	439
	ul. Miedziana	1,2	570	190	210	636	475	158		501
	ul. Akacyjowa	0,9	31	61	120	138	22	44	86	99
	Biedrzychów	2,4	240	260	345	494	133	144	192	275
	Guzice	4,3	33	73	87	118	19	43	51	70
	Pieszkowice	4,2	83	88	105	160	46	49	58	89
19.10.01 16:44 $1,7 \cdot 10^8$ 31800 5474	ul. Hubala	1,4	230	240	620	703	164	171	443	502
	ul. 3 Maja	0,7	940	1000	1000	1698	783	833	833	1415
	ul. Sosnowa	1,8	210	210	300	422	117	117	167	235
	Biedrzychów	4,5	83	87	98	155	46	48	54	111
	Guzice	3,0	72	79	87	138	42	46	51	98
	Moskorzyn	3,5	59	62	76	114	42			82
	Pieszkowice	5,8	61	66	84	123	34	37	47	88

30.10.01 9:32 1,4-10 ⁸ 33287 8334	ul. 3 Maja	3,5	75	67	71	123	63	56	59	103
	ul. Sosnowa	3,2	190	200	230	359	106	111	128	200
	ul. Miedziana	3,5	55	85	72	124	46	71	60	104
	Guzice	0,8	960	650	1000	1531	565	382	588	901
	Moskorzyn	2,6	110	120	180	243	79	86	129	173
	Tarnówek	3,8	61	52	87	118	51	43	73	99
	Żuków	3,2	33	41	53	75	24	29	38	53
16.02.02 16:25 4,5-10 ⁸ 32794 8464	ul. Hubala	3,7	51	49	150	166	36	35	107	118
	ul. 3 Maja	3,4	200	330	230	449	167	275	192	374
	ul. Sosnowa	2,9	370	510	290	694	206	283	161	385
	ul. Akacyjowa	3,4	200	100	160	275	143	71	114	196
	Biedrzychów	5,1	360	410	610	818	200	228	339	455
	Grodowiec	4,8	190	140	150	280	158	117	125	233
	Guzice	1,2	62	58	97	129	36	34	57	76
	Komorniki	2,3	340	296	250	515	283	247	208	430
	Moskorzyn	3,1	110	122	134	212	79	87	96	151
	Pieszkowice	4,6	69	190	76	216	38	106	42	120
	Tarnówek	3,6	160	150	150	266	133	125	125	221
	Żuków	3,5	100	120	130	203	71	86	93	145
20-02-2002 12:27 1,5-10 ⁹ 30131 6168	ul. Hubala	0,7	420	1000	1225	407	300	714	875	570
	ul. Kolejowa	0,8	800	1000	1625	833	667	833	1354	1000
	ul. 3 Maja	1,2	1000	1000	1732	833	833	833	1443	1000
	ul. Sosnowa	0,7	1000	1000	1732	556	556	556	962	1000
	ul. Miedziana	0,8	1000	1000	1732	833	833	833	1443	1000
	ul. Akacyjowa	0,5	1000	1000	1732	714	714	714	1237	1000
	Szklary Górne	6,1	260	320	482	156	163	200	301	250
	Biedrzychów	2,7	410	640	841	200	228	356	467	360
	Grodowiec	8,2	120	90	234	150	100	75	195	180
	Komorniki	5,6	250	150	343	129	179	107	245	180
	Moskorzyn	5,0	230	120	404	172	128	67	225	310
	Pieszkowice	4,3	130	86	231	142	108	72	192	170
	Tarnówek	6,2	79	94	147	58	56	67	105	81
	Żuków	7,0	420	1000	1225	407	300	714	875	570
28-04-2002 5:24 1,9-10 ⁸ 29053 6446	ul. Hubala	1,6	160	120	330	386	114	86	236	276
	ul. 3 Maja	2,3	210	240	260	411	175	200	217	343
	ul. Sosnowa	1,5	410	360	520	754	228	200	289	419
	ul. Miedziana	1,9	85	170	150	242	71	142	125	202
	ul. Akacyjowa	1,6	140	230	400	482	100	164	286	344
	Szklary Górne	5,0	86	92	120	174	54	58	75	109
	Biedrzychów	1,6	280	290	960	1041	156	161	533	578
	Grodowiec	8,7	24	28	32	49	20	23	27	41
	Komorniki	6,1	56	62	76	113	47	52	63	94
	Moskorzyn	6,1	37	38	42	68	26	27	30	48

02-07-2002 16:16 1,3·10 ⁸ 30800 6392	ul. 3 Maja	0,9	320	500	100	602	267	417	83	502
	ul. Sosnowa	0,4	1000	1000	1000	1732	556	556	556	962
	ul. Miedziana	0,6	560	1000	1000	1521	467	833	833	1268
	ul. Akacyjowa	0,6	470	430	100	645	336	307	71	461
	Guzice	3,3	89	57	120	160	52	34	71	94
	Pieszkowice	4,4	100	66	61	134	56	37	34	75
26-08-2002 21:51 3,1·10 ⁷ 32507 4501	ul. Hubala	2,3	190	91	240	319	136	65	171	228
	ul. Kolejowa	2,1	188	153	245	345	157	128	204	287
	ul. 3 Maja	1,7	240	220	260	417	200	183	217	347
	ul. Sosnowa	3,0	140	150	160	260	78	83	89	145
	ul. Miedziana	2,1	160	145	156	266	133	121	130	222
	Pieszkowice	3,3	120	123	132	217	86	88	94	155
	Tarnówek	7,0	29	19	16	38	24	16	13	32
17-09-2002 14:06 2,8·10 ⁸ 33062 8261	ul. Kolejowa	3,1	97	105	106	178	81	88	88	148
	ul. 3 Maja	3,3	94	89	121	177	78	74	101	148
	ul. Sosnowa	3,0	100	112	125	195	56	62	69	109
	ul. Akacyjowa	3,4	110	60	87	153	79	43	62	109
	Grodowiec	4,8	99	180	230	308	83	150	192	257
	Guzice	0,9	650	660	1000	1363	382	388	588	802
	Komorniki	2,4	170	200	140	297	142	167	117	248
	Moskorzyn	2,8	180	110	140	253	129	79	100	181
	Tarnówek	3,8	62	78	59	116	52	65	49	96
	Żuków	3,4	110	124	132	212	79	89	94	151
30-09-2002 22:41 1,1·10 ⁷ 30686 6248	ul. Kolejowa	0,4	880	799	2817	3057	733	666	2348	2548
	ul. 3 Maja	0,8	470	540	1400	1572	392	450	1167	1310
	ul. Sosnowa	0,5	590	360	1400	1561	328	200	778	867
	ul. Miedziana	0,5	510	680	950	1275	425	567	792	1062
	ul. Akacyjowa	0,4	650	240	1700	1836	464	171	1214	1311
10-10-2002 19:20 2,8·10 ⁸ 29473, 7494	ul. Kolejowa	2,1	88	88	99	159	73	73	83	133
	ul. Akacyjowa	2,0	130	140	240	307	93	100	171	219
	Tarnówek	5,3	44	42	34	70	37	35	28	58
25-11-2002 4:44 5,4·10 ⁷ 30835, 6421	ul. Hubala	0,9	434	586	1430	1605	310	419	1021	1147
	ul. Akacyjowa	0,6	540	770	1500	1770	386	550	1071	1265
	Tarnówek	5,7	19	23	20	36	16	19	17	30
24-01-2003 19:31 5:11 4,7·10 ⁸ 28300, 5800	ul. 3 Maja	1,0	430	920	1200	1572	358	767	1000	1310
	ul. Sosnowa	0,3	890	590	2900	3090	494	328	1611	1717
	ul. Miedziana	0,7	560	920	1000	1470	467	767	833	1225
	ul. Akacyjowa	0,5	1100	1300	3000	3450	786	929	2143	2464

11-02-2003 3:36 1,2·10 ⁷ 30691 6338	ul. Kolejowa	0,4	481	599	1349	1552	401	499	1124	1294
	ul. 3 Maja	0,9	340	1100	1100	1592	283	917	917	1327
	ul. Sosnowa	0,4	300	450	1600	1689	167	250	889	938
	ul. Miedziana	0,6	290	200	670	757	242	167	558	631
	ul. Akacyjowa	0,5	200	120	810	843	143	86	579	602
	Tarnówek	5,9	10	25	25	37	8	21	21	31
28-03-2003 11:10 1,7·10 ⁸ 30652 6326	ul. Hubala	0,8	936	970	2747	3060	669	693	1962	2186
	ul. Kolejowa	0,5	1601	1022	2818	3398	1334	852	2348	2832
	ul. 3 Maja	0,9	580	1400	2000	2509	483	1167	1667	2091
	ul. Sosnowa	0,4	1000	1200	3000	3382	556	667	1667	1879
	ul. Miedziana	0,6	1600	1800	2100	3195	1333	1500	1750	2663
	ul. Akacyjowa	0,5	1300	1100	3000	3450	929	786	2143	2464
	Grodowiec	7,7	23	28	29	46	19	23	24	38
	Guzice	3,4	100	57	120	166	59	34	71	98
	Komorniki	5,2	100	64	47	128	83	53	39	106
	Moskorzyn	4,5	54	72	57	107	39	51	41	76
	Pieszkowice	4,4	210	130	130	279	117	72	72	155
	Tarnówek	5,9	33	43	31	62	28	36	26	52
	Trzebcz	2,8	77	80	84	139	48	50	53	87
29-05-2003	ul. 3 Maja	0,9	370	570	750	1012	308	475	625	843
	ul. Sosnowa	0,4	730	990	3000	3242	406	550	1667	1801
	ul. Miedziana	0,6	310	260	640	757	258	217	533	631
	ul. Akacyjowa	0,5	640	540	1200	1463	457	386	857	1045
31-05-2003 18:08 3,6·10 ⁸ 34212 6582	ul. 3 Maja	3,3	170	110	130	241	142	92	108	201
	ul. Miedziana	3,4	32	64	50	87	27	53	42	73
	Guzice	1,2	180	340	720	816	106	200	424	480
	Tarnówek	5,8	26	33	25	49	22	28	21	41
25-07-2003 9:34 1,8·10 ⁷ 31701 6353	ul. 3 Maja	1,0	260	240	580	679	217	200	483	566
	ul. Sosnowa	1,2	250	110	390	476	139	61	217	265
	ul. Miedziana	1,0	100	150	270	325	83	125	225	271
	ul. Akacyjowa	1,2	130	120	160	239	93	86	114	170
05-10-2003 5:52 3,1·10 ⁸ 31900 9500	ul. Kolejowa	3,6	73	157	153	231	61	131	128	193
	ul. 3 Maja	4,0	120	200	120	262	100	167	100	219
	ul. Sosnowa	3,1	210	260	350	484	117	144	194	269
	Guzice	2,6	260	380	320	561	153	224	188	330
	Komorniki	1,9	560	150	270	640	467	125	225	533
	Tarnówek	2,5	107	102	147	208	89	85	123	174
	Żuków	3,7	82	240	70	263	59	171	50	188
	Trzebcz	3,1	350	300	300	550	219	188	188	344

25-01-2004 6:10 1,3·10 ⁸	ul. 3 Maja	3,3	140	160	120	244	117	133	100	203
	ul. Sosnowa	2,3	240	120	170	318	133	67	94	176
	ul. Miedziana	3,0	120	96	130	201	100	80	108	168
	ul. Akacyjowa	2,7	93	150	97	201	66	107	69	144
	Biedzychów	0,6	1100	890	1300	1921	611	494	722	1067
	Pieszkowice	2,9	180	110	65	221	100	61	36	123
27-01-2004 12:11 1,2·10 ⁸ 32598 5100	ul. Hubala	2,2	383	125	708	815	274	89	506	582
	ul. Kolejowa	1,9	340	261	518	672	283	218	432	560
	ul. 3 Maja	1,5	690	400	1600	1788	575	333	1333	1490
	ul. Miedziana	1,9	190	280	670	751	158	233	558	625
	ul. Akacyjowa	2,2	64	190	380	430	46	136	271	307
15-02-2004 5:39 1,9·10 ⁸ 28650 7700	ul. Hubala	2,8	174	142	396	455	124	101	283	325
	ul. Kolejowa	2,9	118	65	144	197	98	54	120	164
	ul. 3 Maja	3,3	150	120	170	257	125	100	142	214
	ul. Sosnowa	2,1	200	170	170	313	111	94	94	174
	ul. Miedziana	2,9	110	150	150	239	92	125	125	199
	Biedzychów	0,9	860	580	840	1335	478	322	467	742
17-04-2004 11:02 1,0·10 ⁷ 24964 6429	ul. 3 Maja	6,2	330	790	1100	1394	275	658	917	1162
	ul. Sosnowa	5,6	1000	480	2100	2375	556	267	1167	1319
	ul. Miedziana	5,9	430	590	1300	1491	358	492	1083	1242
	ul. Akacyjowa	5,6	940	680	2100	2399	671	486	1500	1714
09-05-2004 8:50 2,9·10 ⁷ 30571 6462	ul. Hubala	0,9	344	277	818	930	246	198	584	664
	ul. Kolejowa	0,6	661	888	2163	2430	551	740	1803	2025
	ul. 3 Maja	1,1	410	570	1300	1477	342	475	1083	1231
	ul. Sosnowa	0,3	930	870	1900	2287	517	483	1056	1271
	ul. Miedziana	0,8	440	420	1300	1435	367	350	1083	1196
	ul. Akacyjowa	0,6	740	310	1700	1880	529	221	1214	1343
16-05-2004 11:53 8,4·10 ⁸ 31462 5033	ul. Kolejowa	1,1	402	442	795	994	335	368	663	829
	ul. 3 Maja	0,6	940	1000	1600	2108	783	833	1333	1757
	ul. Sosnowa	1,9	330	620	580	911	183	344	322	506
	ul. Miedziana	0,9	540	480	880	1139	450	400	733	949
	ul. Akacyjowa	1,2	270	320	790	894	193	229	564	639
	Biedzychów	4,4	120	190	240	329	67	106	133	183
	Grodowiec	8,4	60	64	66	110	50	53	55	91
	Guzice	3,5	220	260	250	422	129	153	147	249
	Komorniki	6,0	86	99	61	145	72	83	51	121
	Moskorzyn	3,9	200	210	230	370	143	150	164	264
	Pieszkowice	6,0	91	85	59	138	51	47	33	77
	Tarnówek	7,0	44	36	38	68	37	30	32	57
	Żuków	7,0	60	71	52	107	43	51	37	76
	Trzebcz	3,5	210	240	170	361	131	150	106	226

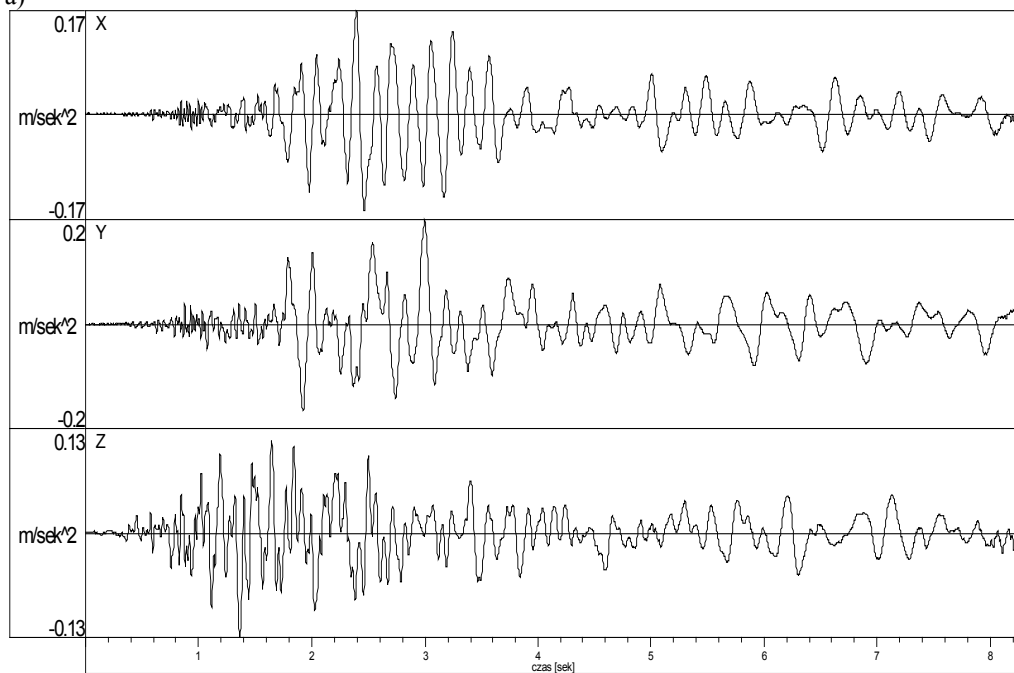
16-05-2004 11:58 8,9·10 ⁷ 31400 5000	ul. Kolejowa	1,1	12	11	45	48	10	9	38	40
	ul. 3 Maja	0,6	830	930	1600	2028	692	775	1333	1690
	ul. Sosnowa	1,9	220	210	450	543	122	117	250	302
	ul. Miedziana	0,9	220	510	900	1058	183	425	750	881
	ul. Akacyjowa	1,2	170	240	560	633	121	171	400	452
	Biedrzychów	4,4	76	100	66	142	42	56	37	79
	Grodowiec	8,5	22	35	29	50	18	29	24	42
	Guzice	3,6	200	140	270	364	118	82	159	214
	Komorniki	6,0	55	38	37	76	46	32	31	64
	Moskorzyn	4,0	87	130	150	217	62	93	107	155
	Trzebcz	3,5	150	190	130	275	94	119	81	172
07-06-2004 13:37 1,2·10 ⁷ 30774 6634	ul. Kolejowa	0,7	355	571	984	1192	296	476	820	993
	ul. 3 Maja	1,1	290	630	920	1152	242	525	767	960
	ul. Sosnowa	0,3	510	380	1000	1185	283	211	556	658
	ul. Miedziana	0,9	310	440	1000	1136	258	367	833	946
	ul. Akacyjowa	0,8	440	270	1400	1492	314	193	1000	1066
16-06-2004 5:43 2,1·10 ⁷ 30832 6674	ul. Sosnowa	0,3	450	290	500	733	250	161	278	407
	ul. Miedziana	0,9	220	160	400	484	183	133	333	403
	Grodowiec	7,4	16	16	13	26	13	13	11	22
	Guzice	3,1	34	52	23	66	20	31	14	39
	Komorniki	4,8	34	52	23	66	28	43	19	55
	Moskorzyn	4,3	43	65	45	90	31	46	32	64
	Trzebcz	4,5	79	87	55	130	49	54	34	81
20-06-2004 5:59 1,4·10 ⁸ 28600 7300	ul. Kolejowa	2,7	69	44	125	149	58	37	104	125
	ul. 3 Maja	3,1	87	85	240	269	160	71	200	266
	ul. Sosnowa	2,0	240	160	250	382	133	89	139	212
	ul. Miedziana	2,7	56	94	95	145	47	78	79	121
	ul. Akacyjowa	2,4	45	84	130	161	32	60	93	115
	Biedrzychów	0,8	450	350	860	1032	250	194	478	573
	Grodowiec	8,5	28	32	38	57	23	27	32	23
	Komorniki	5,9	50	35	25	66	42	29	21	55
	Moskorzyn	6,6	30	44	47	71	21	31	34	51
	Tarnówek	5,9	27	27	20	43	23	23	17	36
	Trzebcz	4,2	70	120	56	150	44	75	35	94
25.08.2004 8:55 1,3·10 ⁸ 27449 8778	ul. 3 Maja	4,9	41	38	33	65	34	32	28	54
	ul. Sosnowa	3,7	75	62	69	119	42	34	38	66
	ul. Miedziana	4,6	29	29	38	56	24	24	32	47
	ul. Akacyjowa	4,3	29	32	41	60	21	23	29	43
	Biedrzychów	1,3	320	570	190	681	178	317	106	378
	Grodowiec	8,8	45	20	16	52	38	17	13	43
	Komorniki	6,3	51	23	15	58	43	19	13	48
	Moskorzyn	8	18	26	18	36	13	19	13	26
	Pieszkowice	1,8	130	120	100	203	72	67	56	113
	Trzebcz	5,2	48	38	27	67	30	24	17	42

29-08-2004 5:34 7,5·10 ⁷ 28800 7100	ul. 3 Maja	2,8	100	78	130	182	83	65	108	151
	ul. Sosnowa	1,8	130	200	280	368	72	111	156	204
	ul. Miedziana	2,5	73	78	140	176	61	65	117	147
	ul. Akacyjowa	2,2	59	82	110	149	42	59	79	107
	Biedrzychów	1,1	510	390	940	1138	283	217	522	632
	Grodowiec	8,5	18	23	13	32	15	19	11	27
	Moskorzyn	6,4	32	41	31	61	23	29	22	43
	Trzebcz	4,0	78	110	42	141	49	69	26	88
02-09-2004 7:24 1,8·10 ⁹ 31958 9150	ul. 3 Maja	3,7	170	200	130	293	142	167	108	244
	ul. Sosnowa	2,8	350	360	460	681	194	200	256	378
	ul. Miedziana	3,6	170	130	240	322	142	108	200	268
	ul. Akacyjowa	3,5	210	59	230	317	150	42	164	226
	Biedrzychów	4,5	300	150	180	381	167	83	100	211
	Grodowiec	4,8	150	210	150	298	125	175	125	249
	Guzice	2,3	330	260	490	645	194	153	288	380
	Komorniki	2,1	800	270	320	903	667	225	267	752
	Moskorzyn	4,2	140	120	150	238	100	86	107	170
	Pieszkowice	3,6	77	210	160	275	43	117	89	153
	Tarnówek	2,9	120	180	110	243	100	150	92	202
	Żuków	3,8	100	200	140	264	71	143	100	188
	Trzebcz	1,8	2000	900	1800	2837	1250	563	1125	1773
09-09-2004 22:52 1,5·10 ⁸ 29462 7464	ul. 3 Maja	2,5	140	210	130	284	117	175	108	237
	ul. Sosnowa	1,3	470	240	300	607	261	133	167	337
	ul. Miedziana	2,2	200	140	120	272	167	117	100	227
	ul. Akacyjowa	1,9	210	210	210	364	150	150	150	260
	Biedrzychów	1,7	520	220	890	1054	289	122	494	586
	Grodowiec	7,7	57	52	58	97	48	43	48	80
	Guzice	4,3	140	120	82	202	82	71	48	119
	Komorniki	5,1	110	50	47	130	92	42	39	108
	Pieszkowice	2,9	190	100	100	237	106	56	56	132
	Trzebcz	3,3	180	290	130	365	113	181	81	228
11-09-2004 2:38 2,4·10 ⁷ 36637, 7306	ul. 3 Maja	5,8	32	24	16	43	27	20	13	36
	ul. Grodowiec	5,3	22	41	45	65	18	34	38	54
	Moskorzyn	1,7	100	32	140	175	71	23	100	125
	Trzebcz	4,1	34	31	23	51	21	19	14	32
26-09-2004 4:11 2,3·10 ⁷ 33146 8152	ul. 3 Maja	3,3	22	31	33	50	18	26	28	42
	ul. Sosnowa	3	24	30	40	55	13	17	22	31
	ul. Miedziana	3,3	24	27	38	52	20	23	32	44
	Grodowiec	4,8	15	15	18	28	13	13	15	23
	Moskorzyn	2,6	55	44	72	101	39	31	51	72
	Trzebcz	0,5	250	310	580	704	156	194	363	440

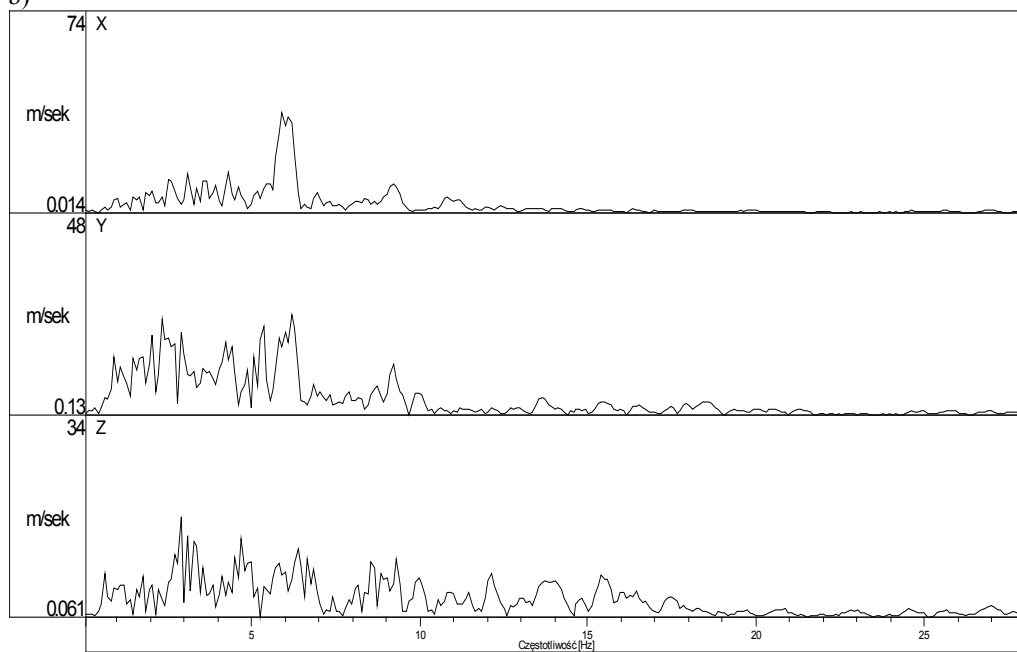
09-10-2004 17:38 3,0-10 ⁸ 30400 10350	ul. 3 Maja	4,9	97	130	64	174	81	108	53	145
	ul. Sosnowa	3,6	100	130	160	229	56	72	89	127
	ul. Miedziana	4,6	130	67	85	169	108	56	71	141
	ul. Akacyjowa	4,5	92	38	75	125	66	27	54	89
	Biedrzyków	3,9	160	110	120	228	89	61	67	127
	Grodowiec	5,4	88	55	91	138	73	46	76	115
	Guzice	4,3	110	110	82	176	65	65	48	103
	Komorniki	3,1	300	200	160	394	250	167	133	329
	Moskorzyn	6,1	88	55	51	116	63	39	36	83
	Pieszkowice	1,9	140	270	150	339	78	150	83	188
06-11-2004 2:08 1,2-10 ⁸ 30907 6766	Tarnówek	2,4	390	200	240	500	325	167	200	416
	Żuków	5	40	87	52	109	29	62	37	78
	Trzebcz	3,1	200	160	110	279	125	100	69	174
	ul. 3 Maja	1,2	290	540	1000	1173	242	450	833	977
	ul. Sosnowa	0,4	1100	1100	1700	2304	611	611	944	1280
	Miedziana	1	650	610	990	1332	542	508	825	1110
	ul. Akacyjowa	0,9	780	350	1300	1556	557	250	929	1111
	Biedrzyków	3,2	170	210	570	631	94	117	317	350
18-11-2004 4:40 3,9-10 ⁷ 33302 8139	Grodowiec	7,2	37	27	26	53	31	23	22	44
	Komorniki	4,7	78	52	41	102	65	43	34	85
	Trzebcz	2,3	130	130	110	214	81	81	69	134
	ul. 3 Maja	3,4	100	76	110	167	83	63	92	139
	ul. Sosnowa	3,1	78	66	110	150	43	37	61	83
	ul. Akacyjowa	3,5	61	33	51	86	44	24	36	61
	Biedrzyków	5,6	73	45	63	106	41	25	35	59
	Grodowiec	4,8	60	76	86	130	50	63	72	108
27-11-2004 18:18 3,0-10 ⁷ 30550 6700	Komorniki	2,5	170	170	95	259	142	142	79	215
	Moskorzyn	2,5	81	81	120	166	58	58	86	118
	Trzebcz	0,6	1100	570	1200	1725	688	356	750	1078
	ul. 3 Maja	1,3	47	93	110	152	39	78	92	126
	ul. Sosnowa	0	320	250	1100	1173	178	139	611	651
	ul. Akacyjowa	0,8	190	140	480	535	136	100	343	382
	Biedrzyków	2,9	100	54	84	141	56	30	47	79
16-12-2004 19:30 1,3-10 ⁷ 35047, 9489	Grodowiec	7,5	19	12	10	25	16	10	8	20
	Trzebcz	2,6	30	46	31	63	19	29	19	39
	Grodowiec	3	33	61	54	88	28	51	45	73
	Komorniki	2	42	79	48	102	35	66	40	85
19-12-2004 0:54 2,5-10 ⁷ 29763 7099	Trzebcz	2,7	24	40	22	52	15	25	14	32
	ul. 3 Maja	2,1	53	130	160	213	44	108	133	177
	ul. Sosnowa	0,9	25	23	51	61	14	13	28	34
	ul. Miedziana	1,7	46	65	100	128	38	54	83	107
	ul. Akacyjowa	1,5	70	68	190	214	50	49	136	153
	Biedrzyków	2	110	81	150	203	61	45	83	113
	Grodowiec	7,8	17	14	12	25	14	12	10	21
	Trzebcz	3,1	34	47	39	70	21	29	24	44

Kopalnia „Polkowice” – ul. 3 Maja

a)

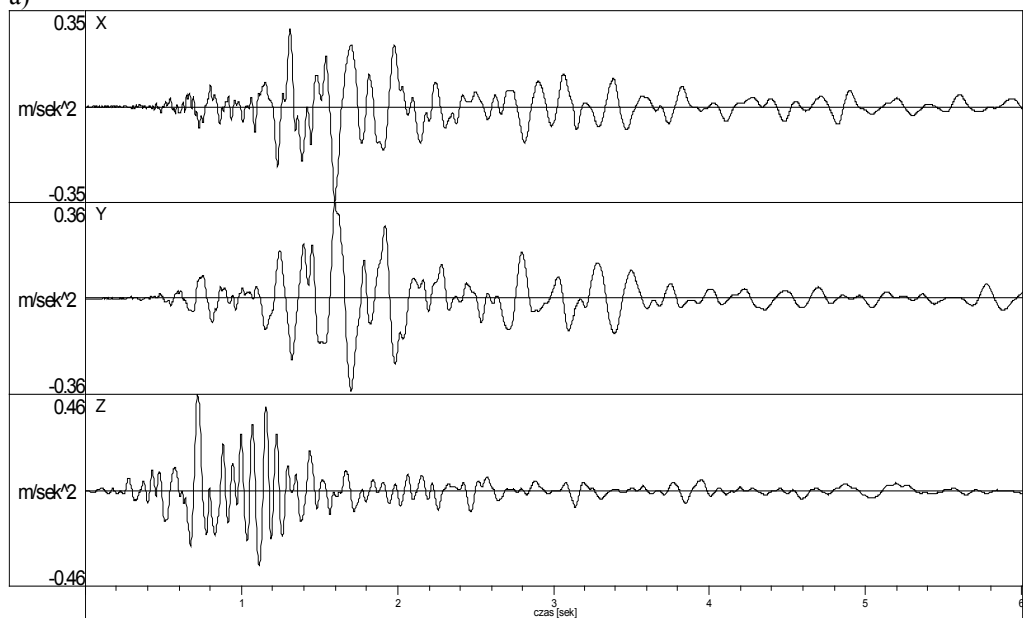


b)

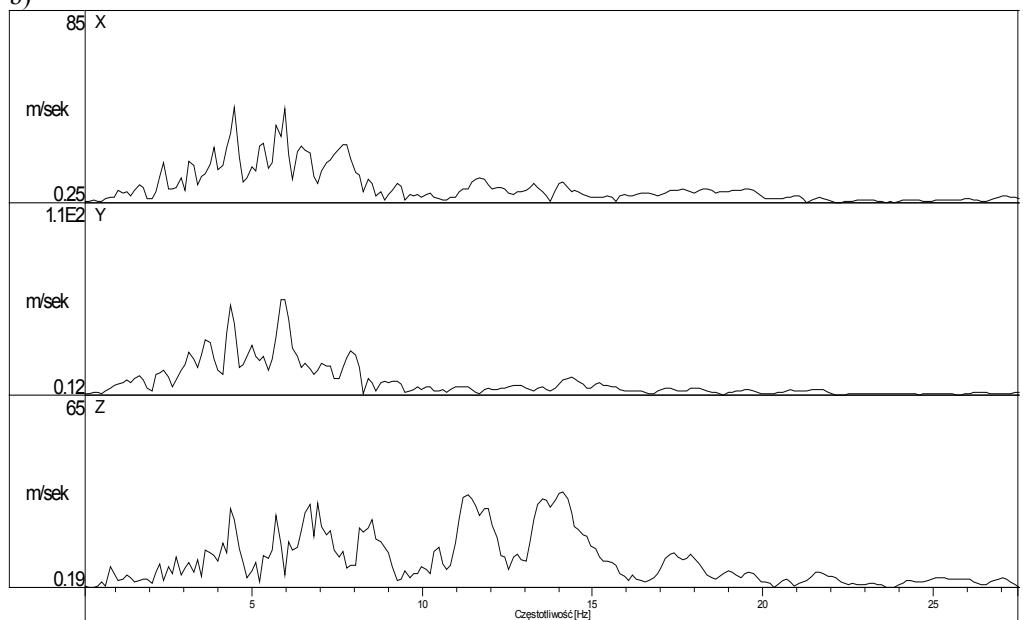


Kopalnia „Polkowice” – ul. Sosnowa

a)

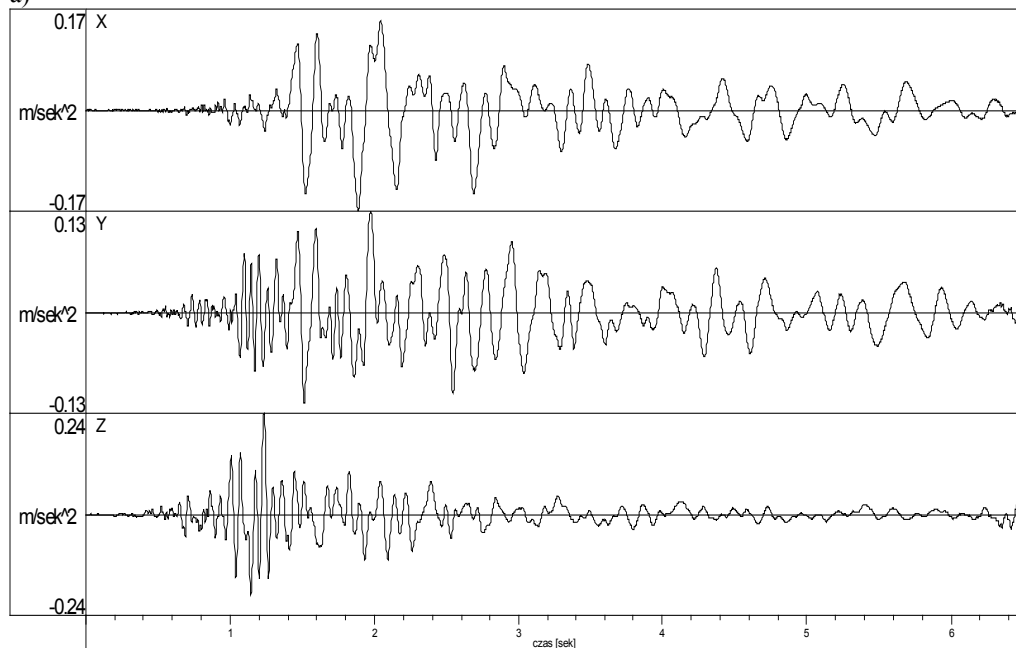


b)

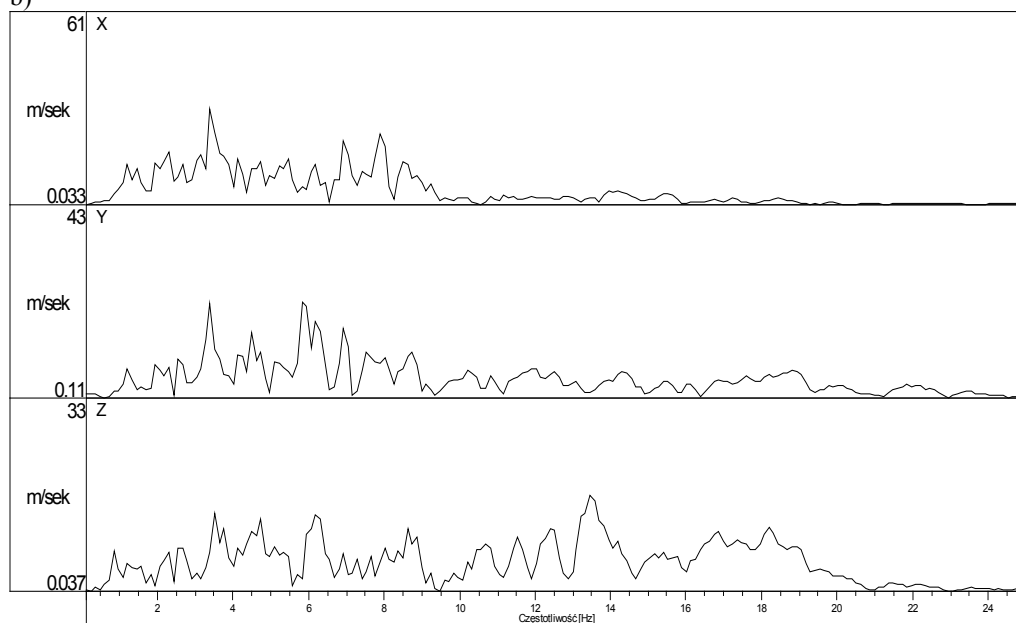


Kopalnia „Polkowice” – ul. Miedziana

a)

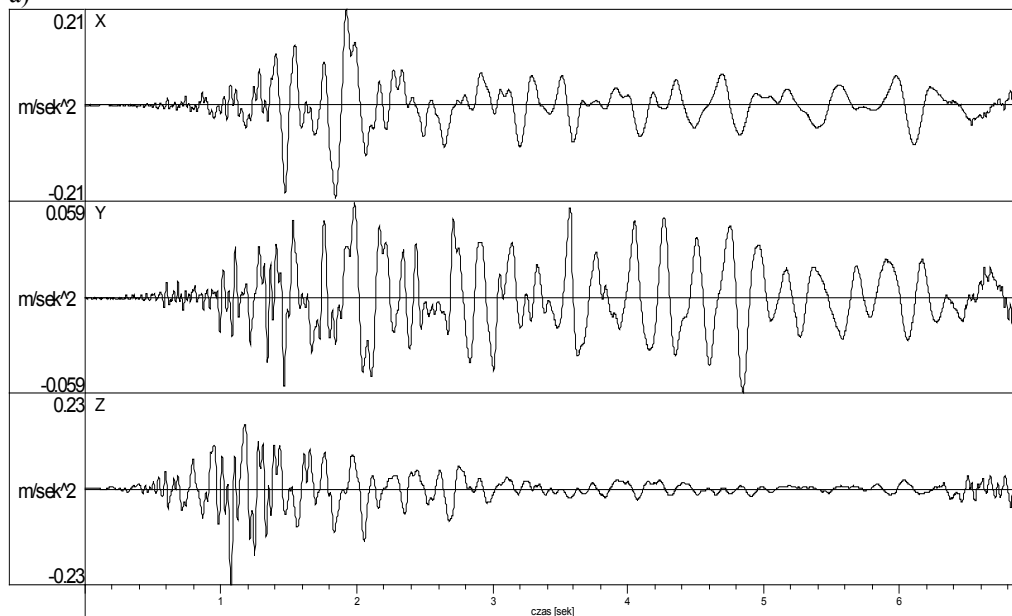


b)

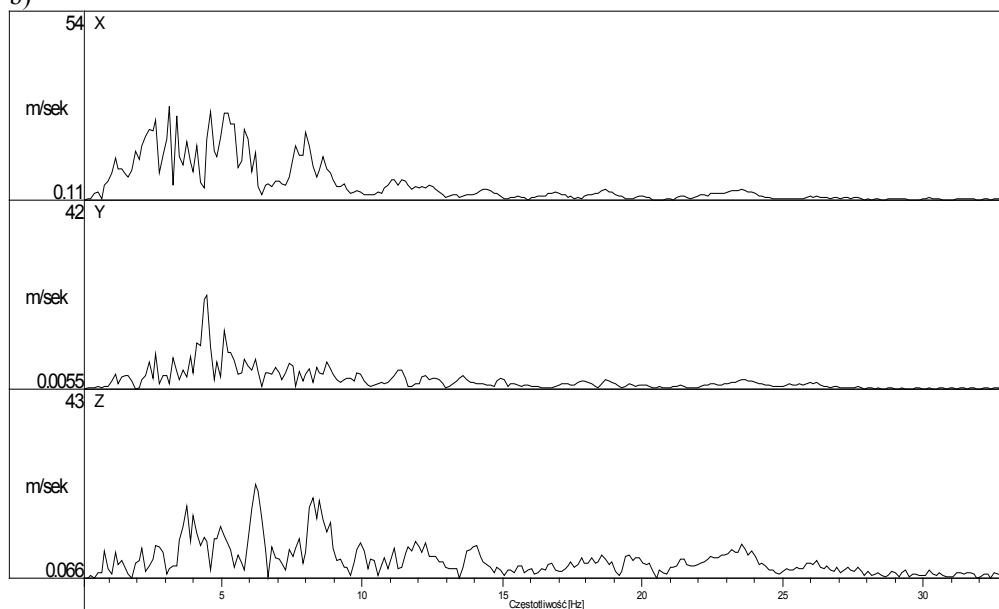


Kopalnia „Polkowice” – ul. Akacyjowa

a)

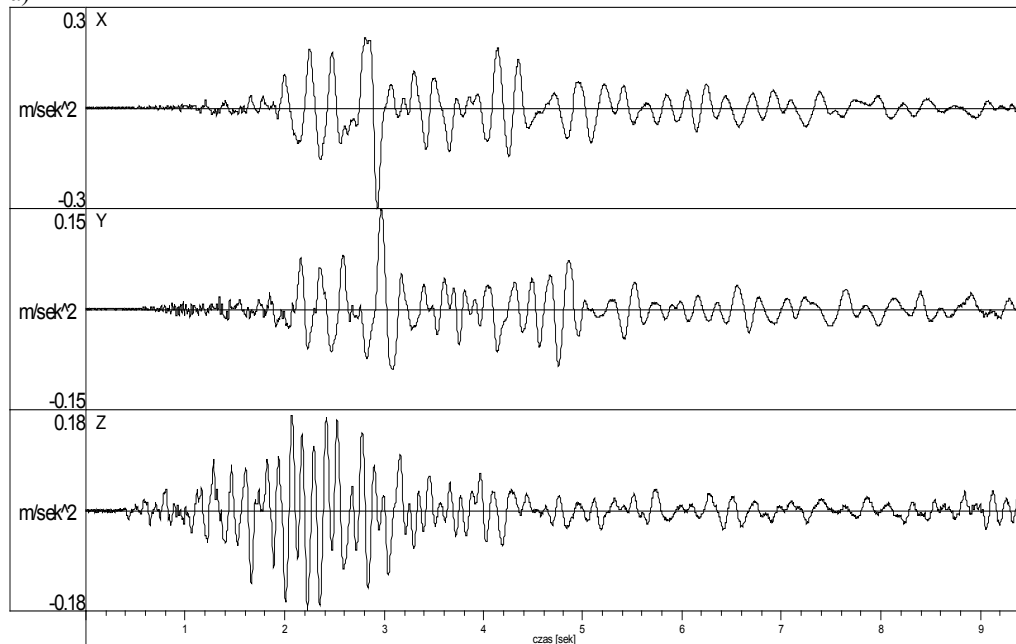


b)

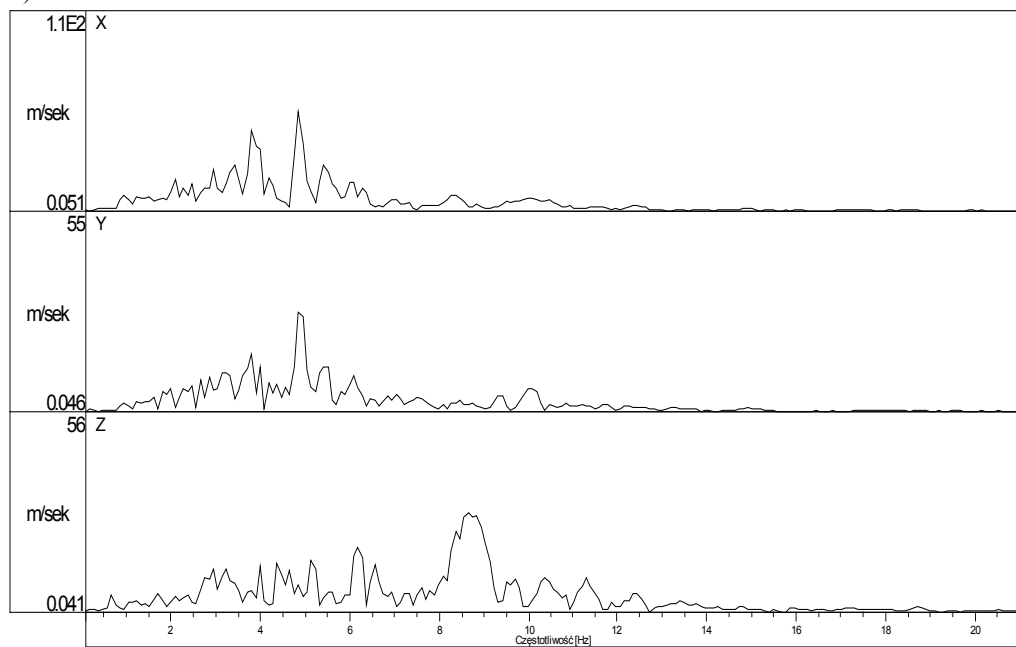


Biedzychów

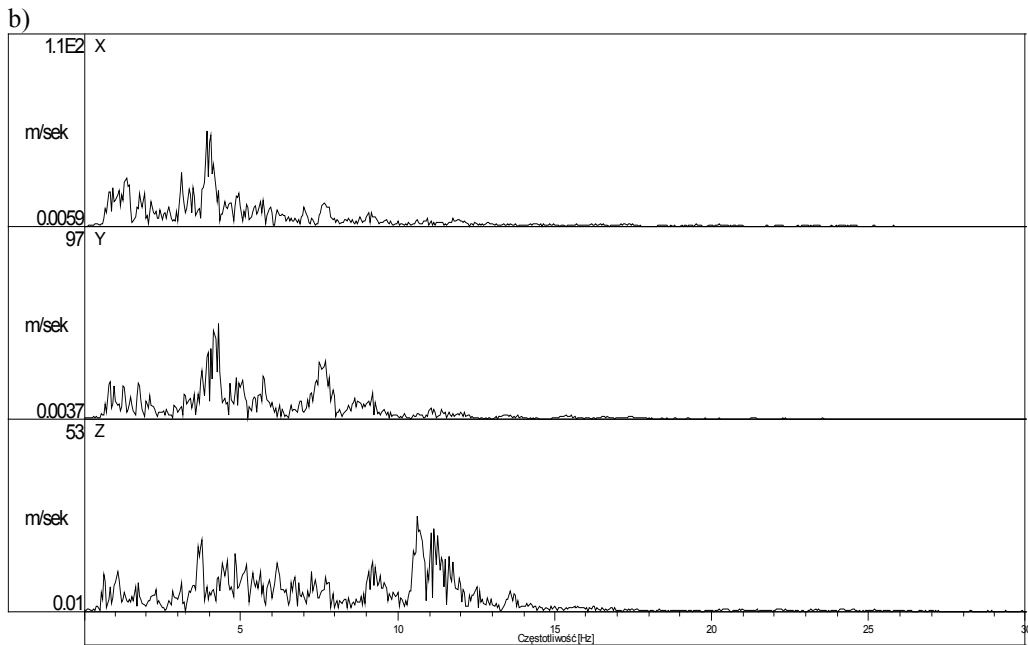
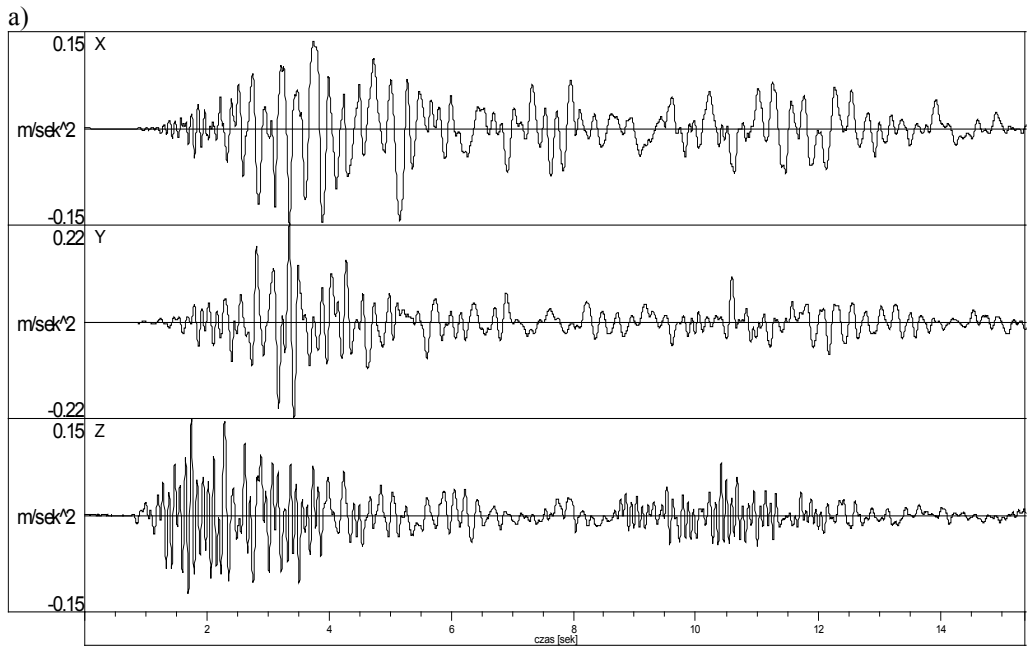
a)



b)

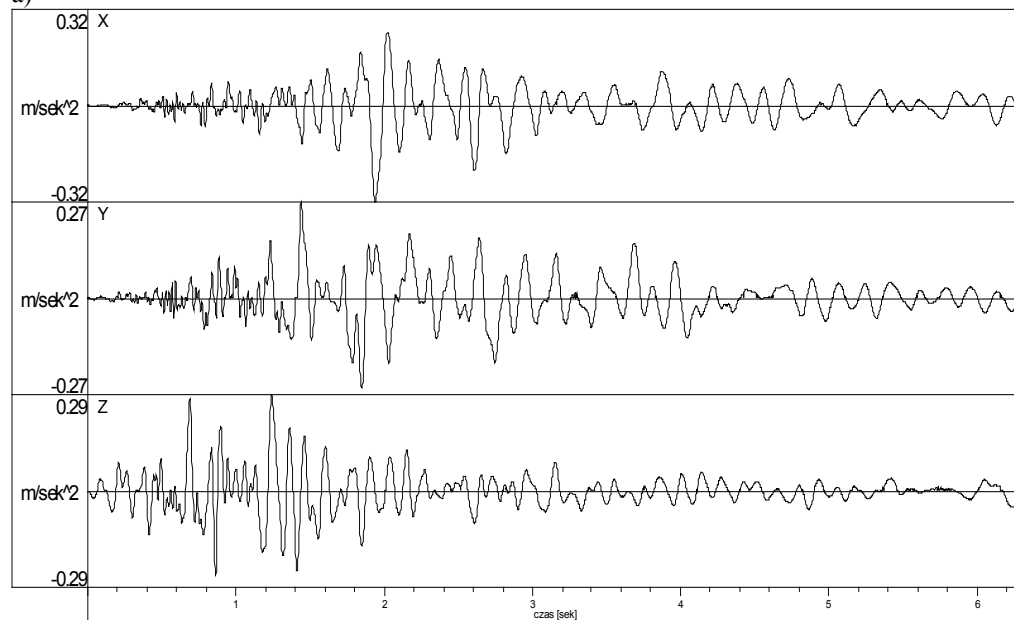


Grodowiec

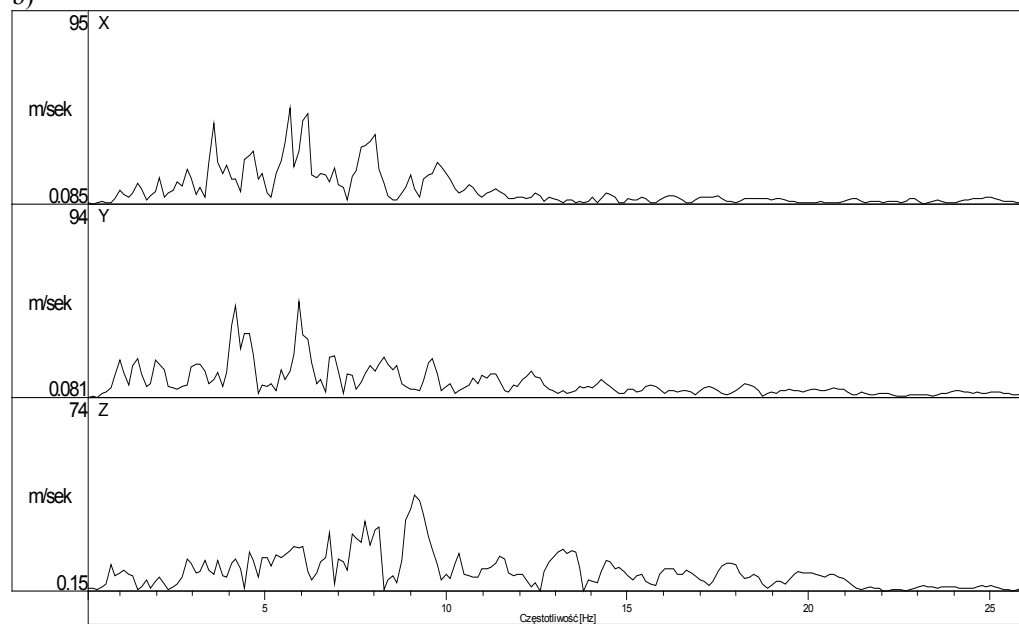


Guzice

a)

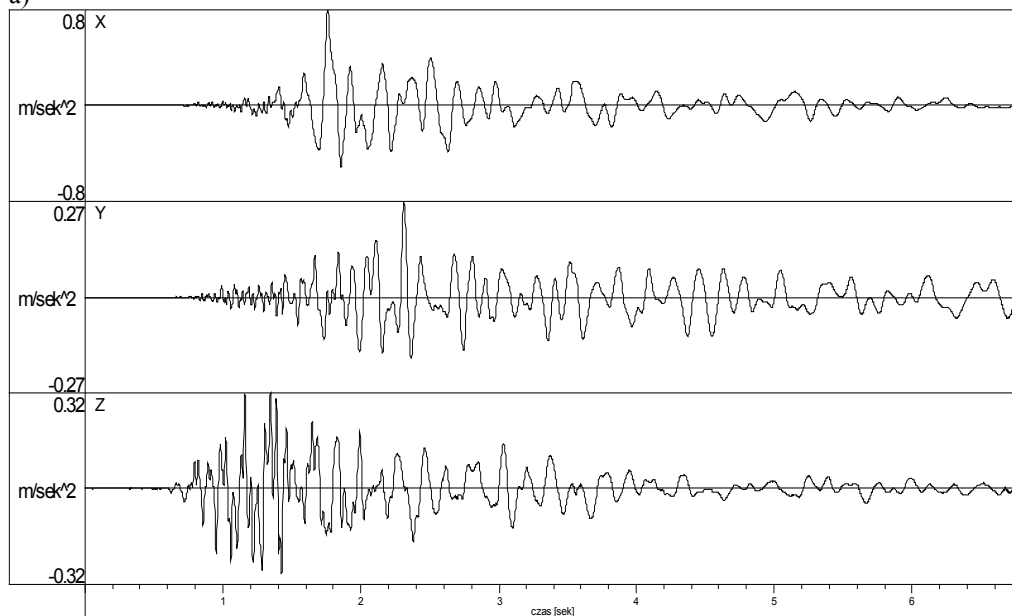


b)

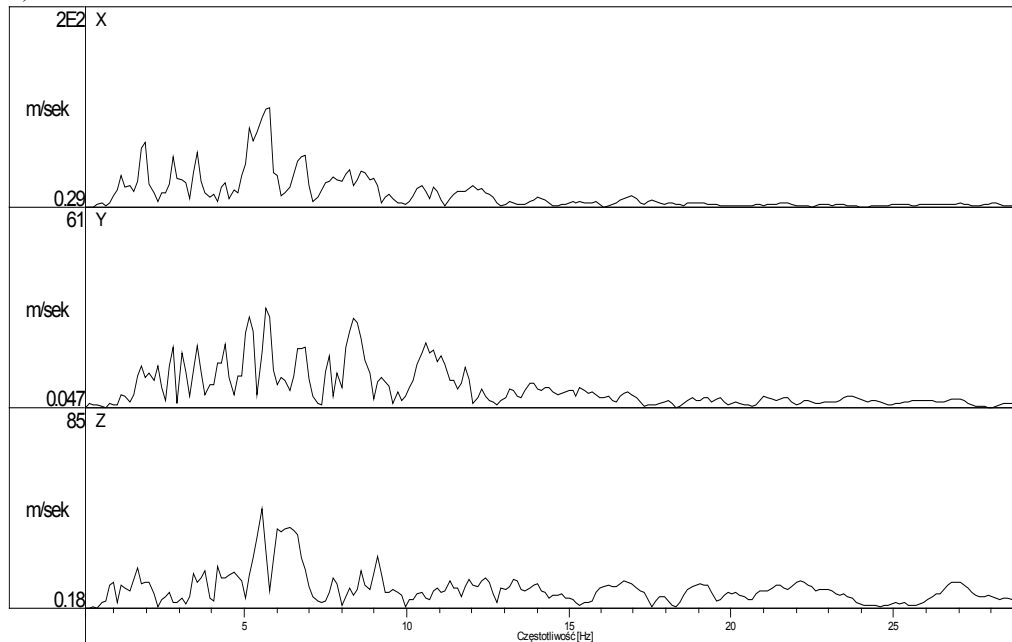


Komorniki

a)

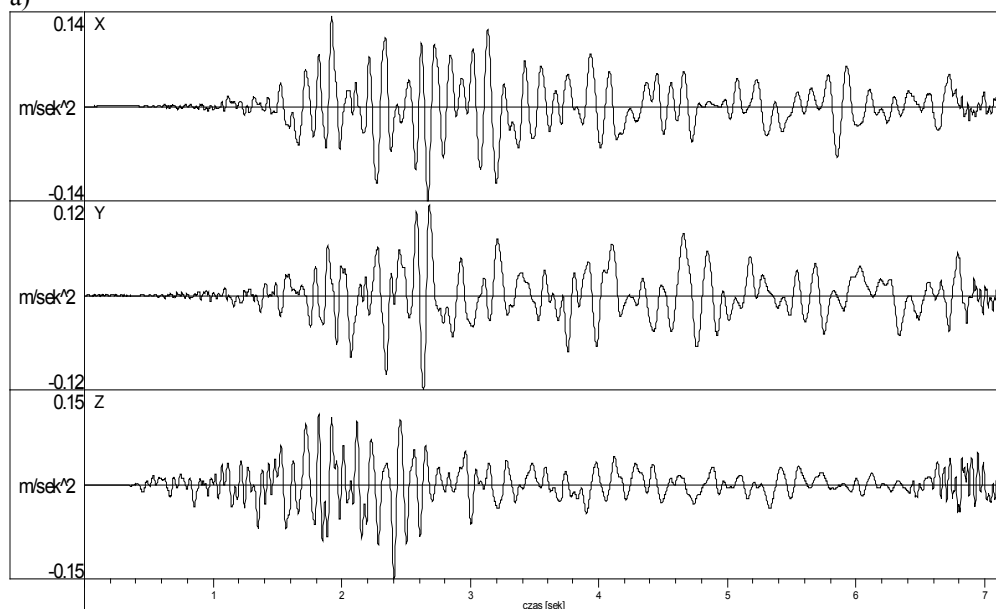


b)

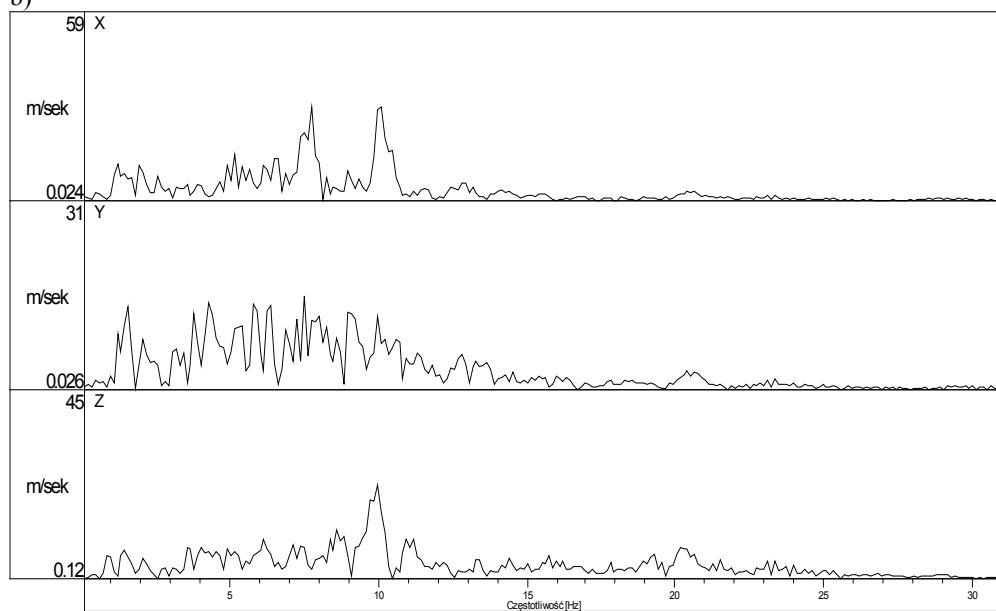


Moskorzyn

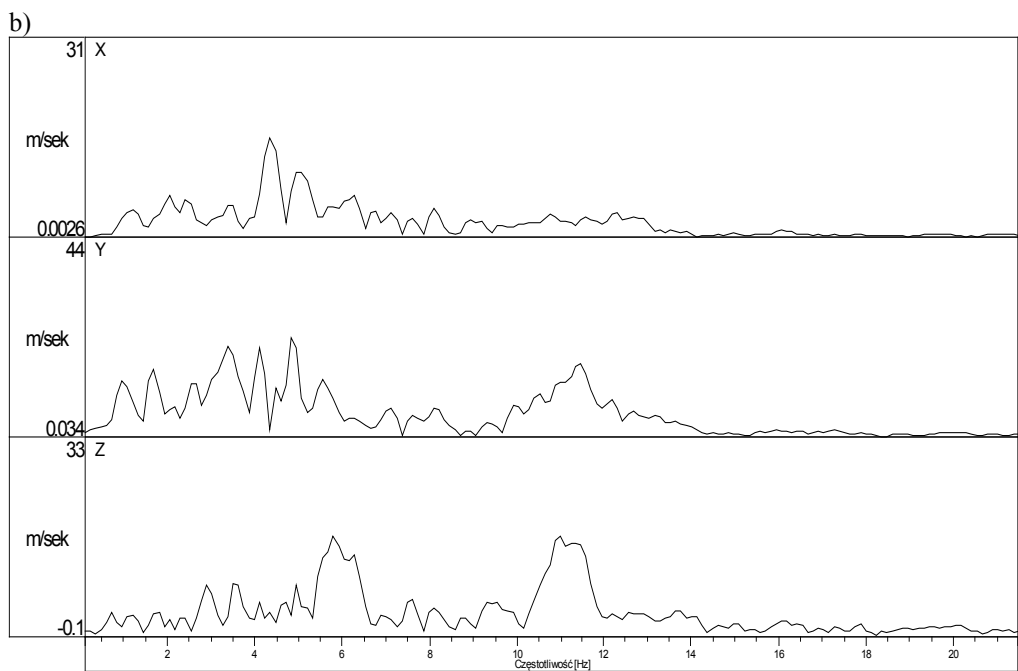
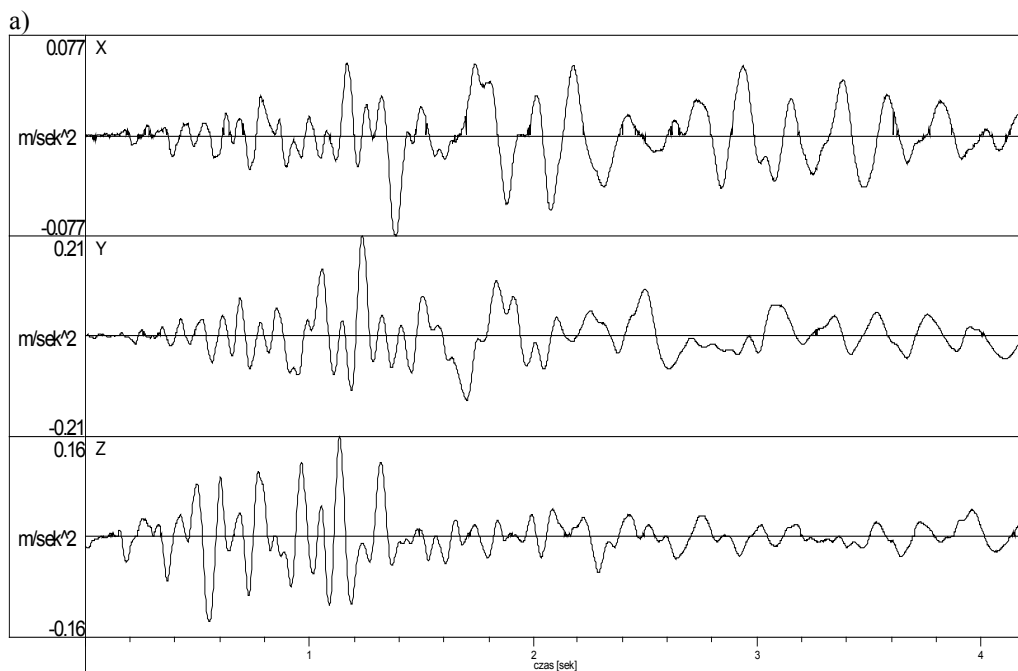
a)



b)

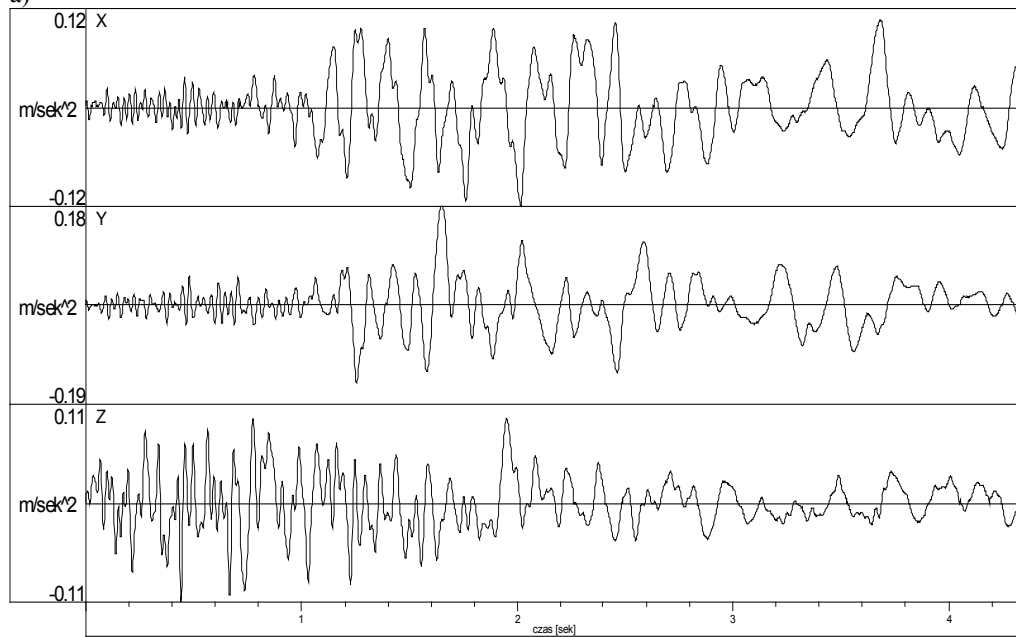


Pieszkowice

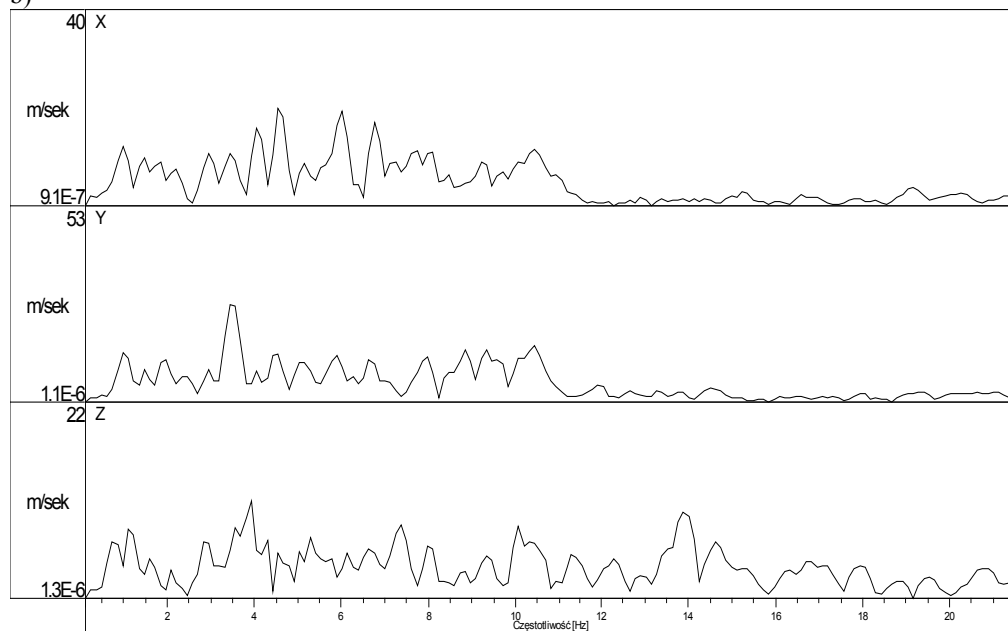


Tarnówek

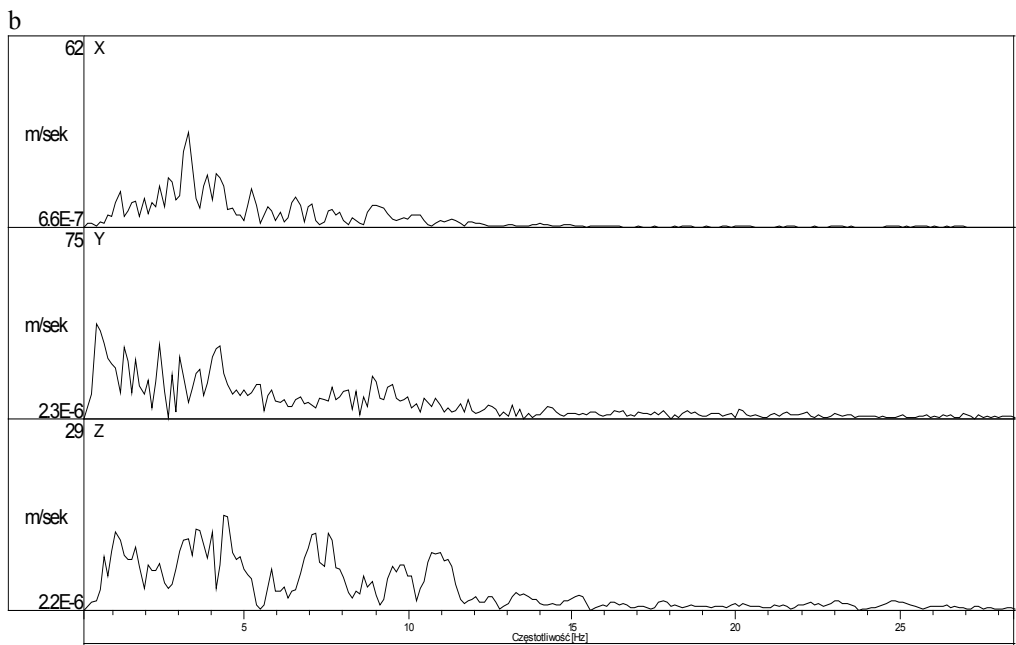
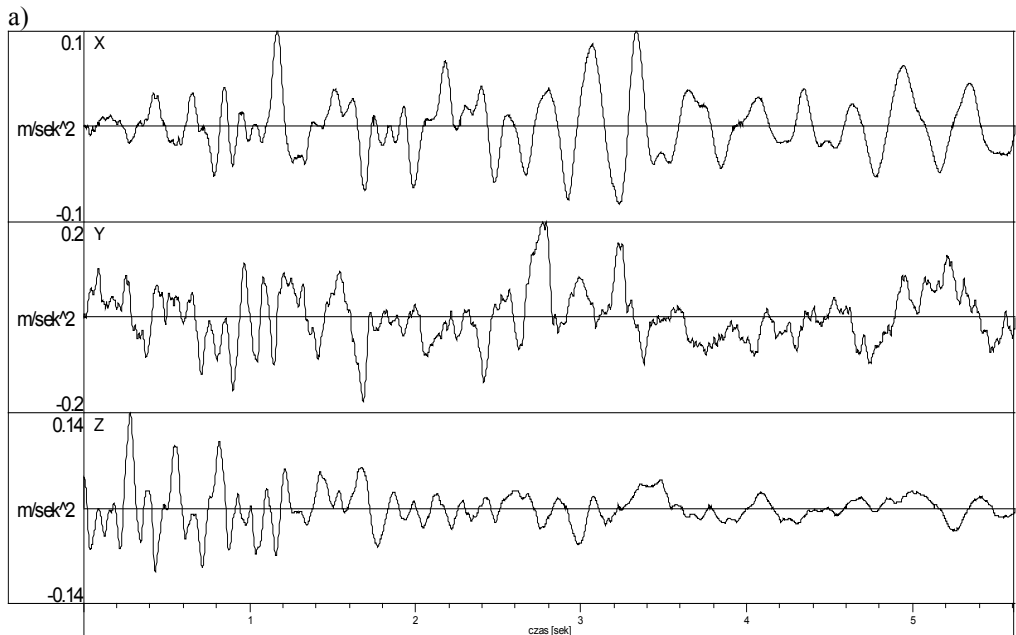
a)



b)

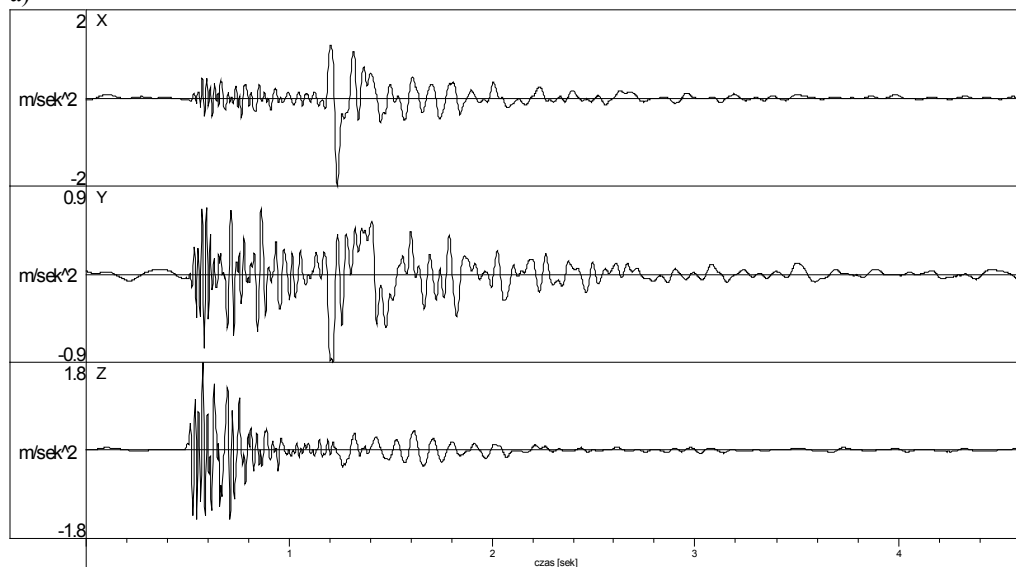


Żuków

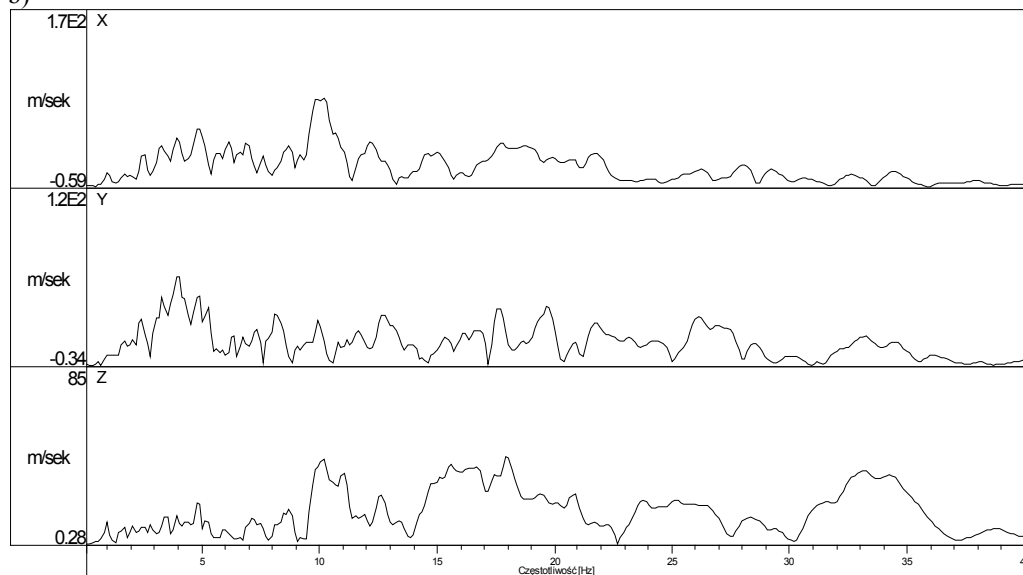


Trzebcz

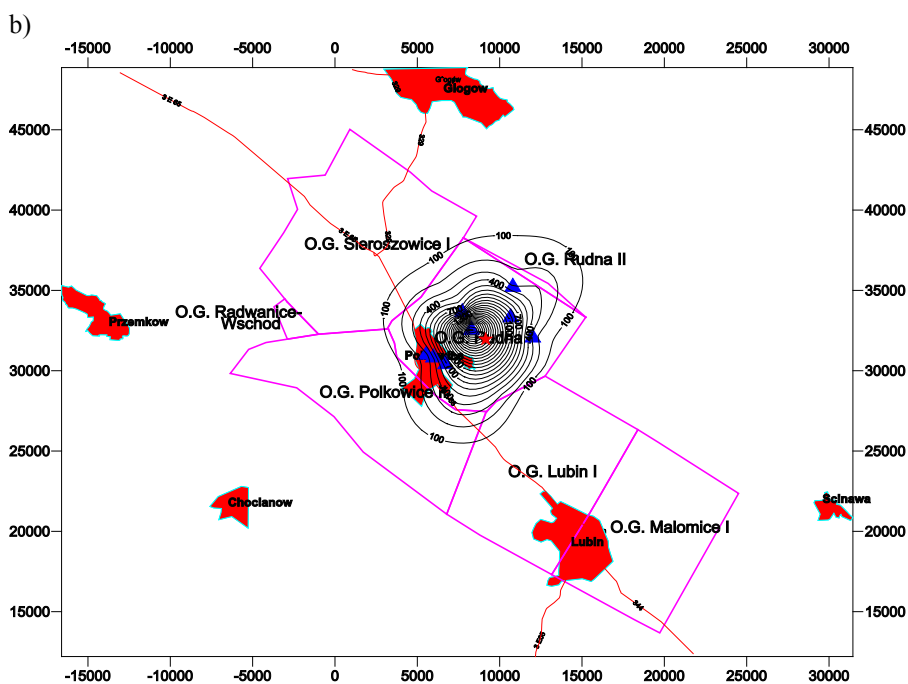
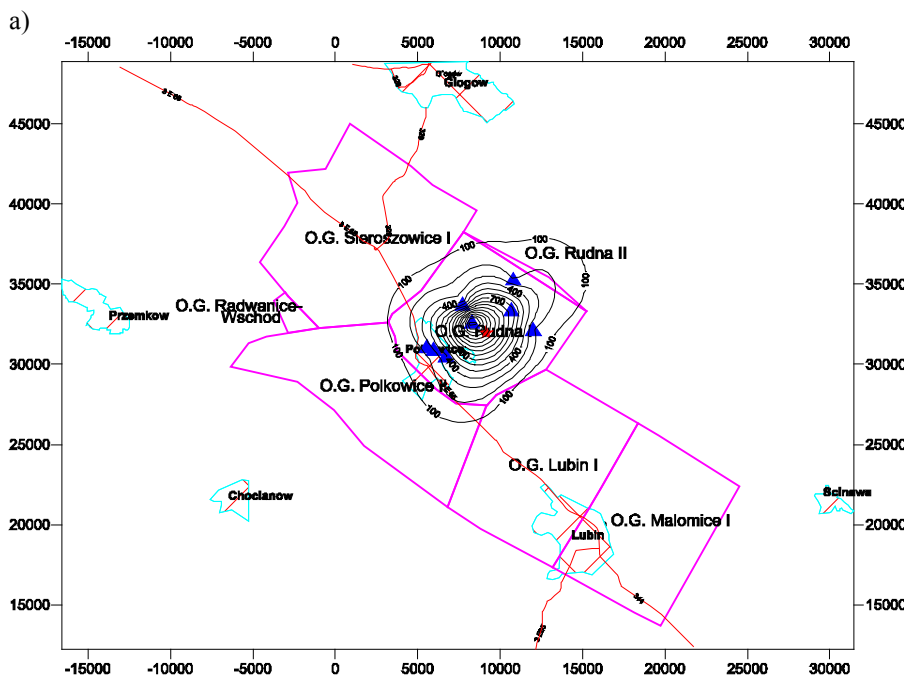
a)



b)



Rys. 3.5. Rejestracje wstrząsu o energii $2 \cdot 10^9$ J z dnia 02.09.2004 roku, na poszczególnych powierzchniowych stanowiskach sejsmometrycznych: a – akceleroqram, b – widmo amplitudowe



Rys. 3.6. Mapa izolinii wypadkowych przyspieszeń drgań gruntu dla wstrząsu o energii sejsmicznej $2 \cdot 10^9$ J z dnia 2.09.2004 roku: a – przyspieszenia drgań pomierzone, b – przyspieszenia drgań z uwzględnieniem amplifikacji

4. Relacja między parametrami źródła sejsmicznego a intensywnością oddziaływań sejsmicznych na powierzchni

4.1. Dane ogólne

Badania przeprowadzono w celu ustalenia zależności między intensywnością oddziaływań sejsmicznych na powierzchni, wyrażonych wartością amplitudy przyspieszenia drgań, a fizycznymi parametrami źródła sejsmicznego charakteryzującymi ognisko wstrząsu. Fizyczne parametry źródła obliczano standardowymi procedurami, których podstawę stanowiła spektralna analiza sejsmogramów wstrząsów.

W analizie spektralnej sejsmogramu wstrząsu stosuje się modele ogniska w postaci dyslokacji kołowej (Brune 1970, Madariaga 1976) lub uskoku prostokątnego (Haskell 1964, Savage 1972), w których spektrum przemieszczeń w dalekim polu jest stałe przy małych częstotliwościach lub jest odwrotnie proporcjonalne do pewnej potęgi częstotliwości przy dużych częstotliwościach. Jednym z najprostszych, a jednocześnie najczęściej używanych modeli, jest model Brune'a (1970, 1971). W modelu tym ognisko jest dyslokacją kołową, przy czym przemieszczenie następuje jednocześnie na całej płaszczyźnie pęknięcia (co oznacza, że czas trwania przemieszczenia w każdym jej punkcie i całkowity czas pęknięcia są krótkie w porównaniu z czasem przebiegu fali sejsmicznych przez jego obszar). Innymi słowy, naprężenia są rozładowywane w sposób natychmiastowy, co jest równoznaczne w układzie liniowym, zadziałaniu w sposób natychmiastowy na wewnętrznej powierzchni płaszczyzny dyslokacji jednostkowego naprężenia. W czasie pęknięcia powierzchnia ta jest równoważna powierzchni całkowicie odbijającej fale poprzeczne rozchodzące się prostopadle do powierzchni dyslokacji. W przypadku stosowania modelu ogniska Brune'a określa się dwa parametry (niskoczęstotliwościowy poziom spektralny Ω_0 , częstotliwość narożna f_0), z których oblicza się następnie fizyczne parametry ogniska.

Poniżej przedstawiono podstawowe zależności opisujące wzajemne relacje między wyjściowymi parametrami spektralnymi a poszczególnymi parametrami fizycznymi ogniska.

– **Częstotliwość narożna f_0 , Hz**

$$f_0 = \left(\frac{I}{2\pi^3 \Omega_0^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.1)$$

gdzie:

Ω_0 – niskoczęstotliwościowy poziom spektralny,

I – całka kwadratów prędkości drgań gruntu.

– **Moment sejsmiczny M_0 , Nm**

$$M_0 = 4\pi \rho C^3 d \Omega_0 / F^C R^C \quad (4.2)$$

gdzie:

- ρ – gęstość ośrodka,
- C – prędkość fali P lub fali S,
- d – odległość hipocentralna,
- F^C – czynnik radiacyjny fal sejsmicznych,
- R^C – współczynnik uwzględniający powiększenia amplitud fal na swobodnej powierzchni (dla fal SH jest równy 2).

Moment sejsmiczny obliczony z zależności (4.2) jest niezależny od modelu źródła, natomiast określenie rozmiarów ogniska zależy od przyjętego modelu.

– **Promień ogniska r_0 , m**

Promień ogniska r_0 uskoku kołowego (ogniska), wyrażony w metrach, jest określony przez częstotliwość narożną w następujący sposób

$$r_0 = kC2\pi f_0^{S,P} \quad (4.3)$$

gdzie k jest stałą zależną od modelu źródła (dla modelu Brune'a wynosi 2,34, a dla modelu Madariagi – 1,32).

Stała k według Madariagi (1976) jest stosowana dla wstrząsów górniczych.

– **Spadek naprężeń $\Delta\sigma$, Pa**

jest obliczany z momentu sejsmicznego M_0 oraz promienia ogniska r_0 i wynosi

$$\Delta\sigma = 7M_0 / 16r_0^3 \quad (4.4)$$

– **Energia spektralna E_s , J**

$$E_s = 3k^3 M_0^2 / (2\pi)^3 / \mu r^3 \quad (4.5)$$

gdzie μ jest modułem sztywności ośrodka w ognisku.

– **Naprężenia pozorne δ_a , Pa**

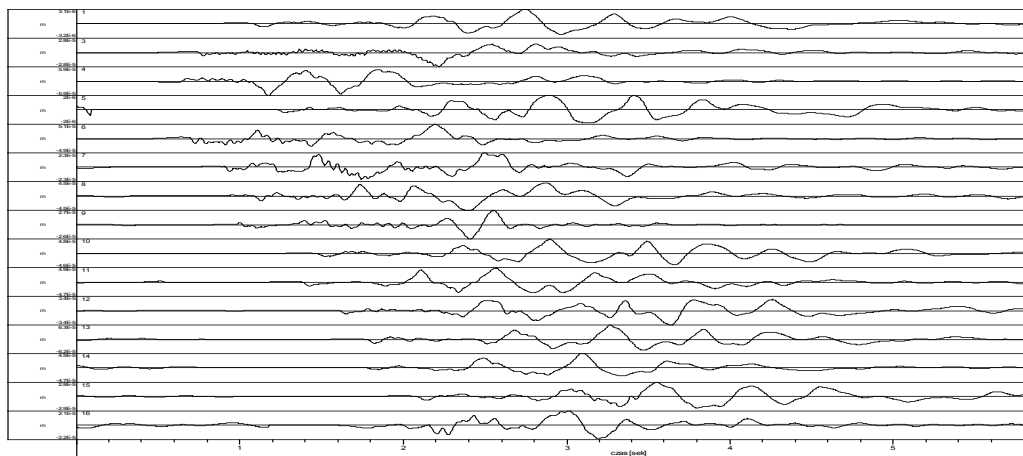
$$\delta_a = \mu E_s / M_0 \quad (4.6)$$

– **Średnie przesunięcie w ognisku $\overline{D}$, m**

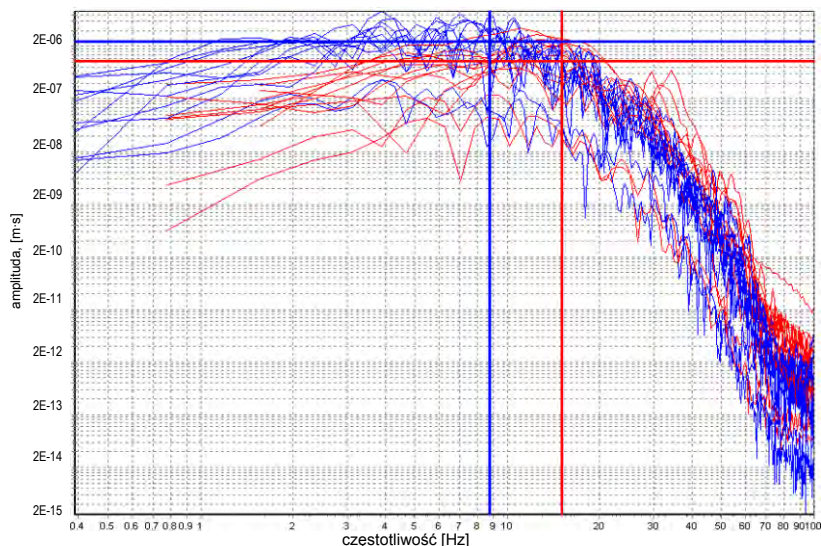
$$\overline{D} = M_0 / \pi \mu r_0^2 \quad (4.7)$$

W analizie spektralnej wykorzystano program SEJSGRAM, a do obliczenia parametrów źródła – program MULTILOK. Oba te programy zostały opracowane w Laboratorium Sejsmologii i Sejsmiki Górniczej GIG. Program SEJSGRAM służy przede wszystkim do analizy sejsmogramów cyfrowych. Jedną z możliwości programu jest odpowiednie przygotowanie sejsmogramu do analizy spektralnej. Przebiegi prędkościowe są poddawane filtracji oraz całkowaniu na przebiegi przemieszczeniowe oraz korekcie linii bazowej. Następnie z przebiegów przemiesz-

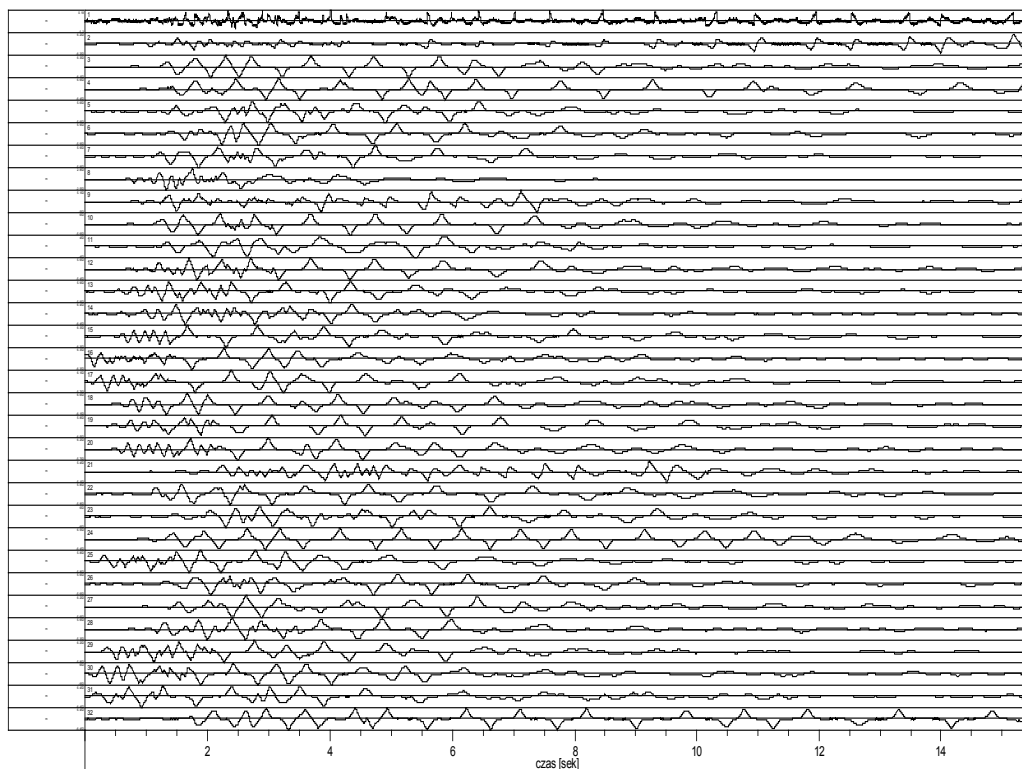
zeniowych jest liczone widmo, które jest przedstawiane w skali logarytmicznej. Procedurę obliczeniową poszczególnych parametrów źródła wykonuje się w programie MULTILOK. Na płaskiej części widma jest wyznaczany poziom spektralny Ω_0 oraz punkt przecięcia części płaskiej i nachylonej, określający częstotliwość narożną f_0 . Te wyznaczone dwa parametry są podstawą do obliczeń poszczególnych parametrów źródła. Na rysunku 4.1a przedstawiono przykład sejsmogramu przemieszczeniowego, a na rysunku 4.1b spektrum przemieszczeniowe wstrząsu w GZW. Na rysunkach 4.2a i 4.2b przedstawiono te same parametry dla wstrząsów w LGOM.



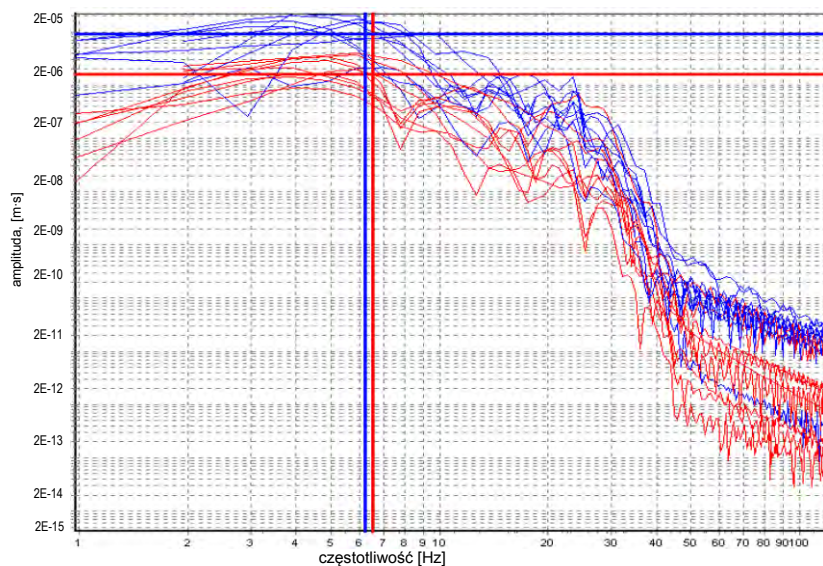
Rys. 4.1a. Sejsmogram przemieszczeniowy wstrząsu o energii sejsmicznej $1 \cdot 10^7$ J z dnia 25.09.2003 roku (obszar GZW)



Rys. 4.1b. Widmo przemieszczeniowe z zaznaczonym poziomem niskoczęstotliwościowym wstrząsu o energii sejsmicznej $1 \cdot 10^7$ J z dnia 25.09.2003 roku (obszar GZW)



Rys. 4.2a. Sejsmogram przemieszczeniowy wstrząsu o energii sejsmicznej $3 \cdot 10^8$ J z dnia 5.10.2003 roku (obszar LGOM)



Rys. 4.2b. Widmo przemieszczeniowe z zaznaczonym poziomem niskoczęstotliwościowym wstrząsu o energii sejsmicznej $3 \cdot 10^8$ J z dnia 5.10.2003 roku (obszar LGOM)

Dane otrzymane w wyniku analizy spektralnej sejsmogramów wstrząsów poddano dalszej analizie w celu określenia zależności między wypadkowym przyspieszeniem drgań gruntu zredukowanym o współczynnik amplifikacji a poszczególnymi parametrami źródła. Do opracowania poszczególnych zależności funkcyjnych zastosowano metodę regresji i model obliczeniowy Joyner-Boore'a (Joyner, Boore 1981), przy założeniu wzrostu poziomu drgań ze wzrostem energii źródła i ich spadku związanego z rozpraszaniem i tłumieniem fali sejsmicznej wraz ze wzrostem odległości epicentralnej. W analizowanym przypadku przyjęto, że wielkość wstrząsu opisują fizyczne parametry źródła uzyskane z analizy spektralnej.

Ogólny model regresyjny ma następującą postać

$$\log a_{zr} = a + b \log(X) - c \log d \quad (4.8)$$

gdzie:

- a_{zr} – maksymalne wypadkowe przyspieszenia drgań gruntu obliczone z trzech składowych kierunkowych i zredukowane o współczynnik amplifikacji drgań;
- X – poszczególne parametry źródła;
- d – odległość epicentralna, m;
- a, b, c – współczynniki estymowane na podstawie danych z rejestracji.

4.2. Wyniki obliczeń parametrów źródła

Obliczenia parametrów źródła na podstawie sejsmogramów rejestrowanych przez dołowe stanowiska kopalnianej sieci sejsmologicznej wykonano dla wszystkich wstrząsów wykazanych w rozdziale 3. Wyniki obliczeń – wartości uśrednione z wybranych nieprzesterowanych kanałów dla zbioru wstrząsów z obszaru GZW – przedstawiono w tablicy 4.1, a dla wstrząsów z obszaru LGOM w tablicy 4.2.

Zbiór wstrząsów z obszaru GZW charakteryzował się przedziałem energetycznym od $6,0 \cdot 10^5$ do $9,0 \cdot 10^7$ J. Należy stwierdzić, że zakresy poszczególnych parametrów źródła, określone dla fali sejsmicznej poprzecznej S, były stosunkowo szerokie. I tak:

- moment sejsmiczny analizowanych zjawisk zawierał się w przedziale od $1,5 \cdot 10^{11}$ (wstrząs o energii $6,0 \cdot 10^5$ J) do $1,4 \cdot 10^{14}$ Nm (wstrząs o energii rzędu $9 \cdot 10^7$ J),
- promień ogniska wynosił od 92 do 190 m,
- przesunięcie w ognisku zawierało się w przedziale od $1,1 \cdot 10^{-3}$ do $4,0 \cdot 10^{-1}$ m, również odpowiednio dla wstrząsu słabego – pierwsza wartość i silnego – druga wartość,
- spadek naprężeń w ognisku zmieniał się w przedziale od $1,1 \cdot 10^5$ do $9,2 \cdot 10^7$ Pa,
- energia spektralna zawierała się w przedziale od $3,0 \cdot 10^6$ do $1,1 \cdot 10^{13}$ J,
- naprężenia pozorne zmieniały się w przedziale od $3,2 \cdot 10^4$ do $4,6 \cdot 10^8$ Pa.

Analizowane wstrząsy z obszaru LGOM należały do najsilniejszych zjawisk, które wystąpiły w latach 2002–2004, a ich parametry fizyczne były następujące:

- energia sejsmiczna poszczególnych zjawisk zawierała się od $6 \cdot 10^6$ do $2 \cdot 10^9$ J,
- moment sejsmiczny zmieniał się w przedziale od $2,4 \cdot 10^{12}$ do $4,8 \cdot 10^{14}$ Nm,
- promień ogniska wynosił od 85 do 240 m,
- przesunięcie w ognisku zawierało się w przedziale od $1,0 \cdot 10^{-1}$ do $8,1 \cdot 10^{-4}$ m,
- spadek naprężeń w ogniskach zmieniał się w przedziale od $5,4 \cdot 10^4$ do $1,3 \cdot 10^7$ Pa,
- energia spektralna zawierała się w przedziale od $2,5 \cdot 10^9$ do $9,4 \cdot 10^{12}$ J,
- naprężenia pozorne zmieniały się w przedziale od $4,6 \cdot 10^5$ do $7,3 \cdot 10^8$ Pa.

Tablica 4.1. Parametry źródła dla analizowanych wstrząsów – obszar GZW

Data	Energia J	x, m	y, m	Fala S							Fala P						
				moment sejsmiczny Nm	promień ogniska m	przesunięcie w ognisku, m	spadek naprężeń, Pa	energia spektralna, J	naprężenia poziome, Pa	moment sejsmiczny Nm	promień ogniska m	przesunięcie w ognisku m	spadek naprężeń Pa	energia spektralna, J	naprężenia poziome Pa		
2003-07-02	6,E+06	17600	2000	3,8E+12	7,5E+01	2,0E-03	8,1E+05	9,0E+06	2,6E+04	5,3E+12	5,8E+01	1,4E-02	2,5E+06	2,4E+08	5,0E+05		
2003-07-03	2,E+06	17640	2240	1,1E+13	1,7E+02	1,8E-03	3,4E+05	1,9E+07	1,9E+04	2,9E+12	5,1E+01	1,5E-02	3,2E+06	2,2E+08	8,1E+05		
2003-07-24	8,E+07	17560	2060	3,1E+13	7,9E+01	1,2E-02	4,1E+06	1,4E+10	5,0E+06	9,2E+12	4,8E+01	2,2E-02	3,7E+06	2,4E+10	2,8E+07		
2003-07-29	9,E+06	17670	2160	2,9E+12	4,5E+01	3,3E-03	1,9E+06	8,0E+07	3,0E+05	1,2E+12	3,7E+01	5,8E-03	1,5E+06	6,8E+07	6,3E+05		
2003-08-08	2,0E+06	16740	-920	3,3E+12	7,8E+01	8,1E-04	1,0E+05	1,5E+06	2,5E+03	1,4E+12	4,7E+01	2,7E-03	2,0E+05	1,6E+07	6,2E+04		
2003-08-09	9,E+05	17550	2260	4,1E+12	6,6E+01	2,4E-03	1,0E+06	3,7E+07	9,9E+04	1,2E+12	5,8E+01	2,7E-03	4,5E+05	4,1E+07	3,8E+05		
2003-08-12	6,0E+07	18611	-1322	4,8E+13	5,9E+01	3,1E-03	4,9E+05	1,7E+07	1,9E+04	5,8E+12	2,0E+01	9,6E-02	1,6E+07	3,6E+09	3,4E+06		
2003-08-12	2,E+06	17570	2040	2,2E+12	5,9E+01	1,7E-03	8,2E+05	2,3E+07	1,1E+05	8,9E+11	4,4E+01	3,7E-03	8,2E+05	3,7E+07	4,6E+05		
2003-08-21	8,E+06	17640	2140	1,8E+13	1,6E+02	3,0E-03	7,4E+05	6,7E+07	4,2E+04	1,5E+13	1,1E+02	1,7E-02	2,2E+06	4,8E+08	3,5E+05		
2003-08-23	8,0E+06	19500	-4320	4,1E+11	2,5E+01	1,3E-03	5,5E+05	2,9E+06	3,9E+04	1,5E+11	1,5E+01	3,6E-03	8,6E+05	9,9E+06	3,7E+05		
2003-08-25	3,E+07	17580	2250	4,2E+12	5,3E+01	4,0E-03	2,1E+06	9,0E+07	2,4E+05	1,8E+12	4,9E+01	6,0E-03	1,2E+06	1,0E+08	6,3E+05		
2003-08-28	9,0E+06	18430	-2750	5,5E+11	2,2E+01	1,9E-03	8,0E+05	6,0E+06	6,1E+04	1,6E+11	1,9E+01	2,3E-03	4,1E+05	4,5E+06	1,5E+05		
2003-09-05	7,E+06	17640	2260	7,3E+12	9,0E+01	3,0E-03	9,9E+05	3,0E+07	4,5E+04	5,0E+12	5,9E+01	1,3E-02	2,3E+06	1,7E+08	3,9E+05		
2003-09-10	8,E+06	17630	2100	2,3E+12	7,4E+01	1,3E-03	5,0E+05	7,1E+06	3,4E+04	9,9E+11	5,7E+01	2,6E-03	4,8E+05	2,0E+07	2,3E+05		
2003-09-14	3,0E+06	17311	-459	5,0E+11	4,2E+01	3,6E-04	7,3E+04	4,4E+05	3,5E+03	2,9E+11	2,8E+01	1,1E-03	1,1E+05	3,0E+06	5,7E+04		
2003-09-18	2,E+07	17590	2160	2,6E+14	4,2E+01	4,3E-01	3,0E+08	6,7E+11	2,8E+07	8,9E+13	3,8E+01	6,2E-01	1,8E+08	8,5E+11	1,1E+08		
2003-09-25	1,E+07	17600	2210	2,7E+12	4,6E+01	3,7E-03	2,4E+06	7,6E+07	3,1E+05	8,9E+11	3,4E+01	6,4E-03	1,9E+06	7,8E+07	9,6E+05		
2003-10-08	2,E+07	17650	2000	1,3E+12	4,9E+01	1,5E-03	8,5E+05	7,4E+06	6,2E+04	1,3E+12	3,3E+01	9,8E-03	2,9E+06	2,7E+08	2,2E+06		
2003-10-08	9,0E+06	15170	4340	2,1E+12	8,4E+01	1,3E-03	4,0E+05	6,1E+06	3,1E+04	9,7E+11	5,9E+01	2,4E-03	4,7E+05	3,0E+07	2,1E+05		
2003-10-15	9,E+06	17680	2230	1,9E+12	5,0E+01	2,4E-03	1,4E+06	2,5E+07	1,4E+05	8,8E+11	3,6E+01	5,7E-03	1,6E+06	5,4E+07	6,7E+05		
2003-10-16	1,0E+07	18315	-2305	1,6E+13	6,5E+01	4,6E-03	4,7E+05	5,7E+08	1,9E+05	6,8E+12	3,1E+01	2,4E-02	1,9E+06	1,0E+09	8,4E+05		
2003-10-17	5,E+06	17850	2060	2,0E+13	4,9E+01	2,1E-02	1,2E+06	2,0E+09	1,1E+06	1,5E+13	5,8E+01	3,3E-01	5,9E+07	2,2E+10	1,6E+07		
2003-10-24	6,0E+06	17291	-442	1,7E+12	5,9E+01	7,1E-04	1,1E+05	7,4E+05	2,4E+03	1,0E+12	4,9E+01	1,9E-03	1,3E+05	9,6E+06	5,2E+04		
2003-10-25	1,0E+07	17382	-411	7,7E+13	3,5E+01	8,2E-02	1,7E+07	2,4E+10	1,7E+06	7,9E+12	1,9E+01	8,2E-01	1,1E+08	8,6E+09	6,0E+07		
2003-10-29	9,0E+06	18137	-432	3,7E+12	2,1E+01	1,4E-02	5,3E+06	2,6E+08	3,8E+06	8,9E+13	1,3E+01	1,2E-02	4,7E+08	2,4E+12	1,5E+08		
2003-10-30	9,0E+06	19500	-2940	4,7E+12	1,0E+02	9,3E-04	1,0E+05	3,7E+06	4,3E+03	3,6E+12	5,7E+01	6,3E-03	4,1E+05	5,5E+07	8,6E+04		
2003-11-04	4,0E+06	17333	-335	1,8E+13	2,9E+01	6,5E-02	2,3E+06	4,5E+09	1,4E+06	6,3E+12	1,9E+01	5,1E-03	2,8E+08	7,8E+09	6,8E+06		
2003-11-07	1,E+06	17700	1970	1,9E+12	5,1E+01	1,9E-03	1,1E+06	2,3E+07	1,3E+05	1,0E+12	2,8E+01	9,6E-03	3,4E+06	1,2E+08	1,3E+06		
2003-11-08	8,E+07	17670	2230	4,4E+12	7,3E+01	3,1E-03	1,4E+06	3,2E+07	8,1E+04	1,5E+12	5,1E+01	6,3E-03	1,4E+06	8,0E+07	5,7E+05		
2003-11-17	1,0E+06	18260	-315	3,8E+13	2,9E+01	4,4E-02	9,8E+06	5,3E+10	7,8E+06	4,7E+12	2,0E+01	3,5E-01	4,0E+07	7,2E+09	8,5E+06		
2003-11-25	9,0E+06	17287	-386	2,1E+12	7,7E+01	4,7E-03	4,4E+05	1,9E+08	4,8E+04	8,7E+12	2,7E+01	4,4E-02	4,0E+06	2,8E+09	1,8E+06		
2003-12-01	2,0E+06	19401	-1012	2,9E+12	6,3E+01	9,6E-04	1,1E+05	7,6E+06	1,4E+04	2,4E+12	2,5E+01	1,5E-02	1,5E+06	3,4E+08	7,9E+05		
2003-12-04	9,E+06	17810	2260	2,3E+12	5,2E+01	2,2E-03	1,2E+06	1,9E+07	8,9E+04	1,2E+12	3,7E+01	6,9E-03	1,8E+06	7,3E+07	6,5E+05		
2003-12-09	2,E+07	17690	2080	2,0E+14	6,0E+01	1,4E-01	6,9E+07	2,0E+11	1,1E+07	1,2E+14	4,5E+01	4,2E-01	9,2E+07	5,8E+11	5,4E+07		
2003-12-16	3,0E+06	17281	-401	6,0E+12	5,3E+01	2,7E-03	3,8E+05	6,7E+07	6,2E+04	2,1E+12	9,2E+00	9,4E-02	2,6E+07	9,1E+09	2,4E+06		
2003-12-18	8,0E+06	17301	-313	2,7E+13	7,2E+01	9,0E-03	1,1E+06	4,9E+08	1,0E+05	6,4E+12	1,5E+01	1,4E-01	2,9E+07	1,3E+10	1,2E+06		
2004-01-10	4,0E+07	17282	-261	9,8E+13	2,0E+01	4,3E-02	1,9E+08	2,7E+11	1,5E+07	1,4E+14	1,3E+01	4,0E-01	9,2E+08	1,1E+13	4,6E+08		
2004-01-15	7,0E+06	17312	-228	2,5E+12	4,7E+01	1,2E-03	1,7E+05	9,0E+06	2,0E+04	1,8E+12	2,0E+01	1,4E-02	1,5E+06	6,9E+08	2,1E+06		
2004-01-20	5,E+06	16230	1800	1,2E+12	1,2E+02	7,9E-04	1,0E+05	2,4E+06	2,3E+03	1,5E+12	1,1E+02	2,3E-03	2,2E+05	1,0E+07	3,2E+04		
2004-01-22	9,0E+07	17655	-122	8,6E+13	2,0E+02	3,7E-02	1,5E+08	1,5E+11	9,4E+06	1,3E+14	1,4E+02	3,2E-01	6,7E+08	7,4E+12	3,2E+08		
2004-01-27	2,0E+06	18221	-319	2,0E+12	4,9E+01	1,1E-03	1,6E+05	1,4E+07	3,9E+04	1,7E+12	3,4E+01	5,5E-03	4,1E+05	1,4E+08	4,5E+05		
2004-01-30	7,E+06	17780	2150	2,3E+12	6,4E+01	1,2E-03	4,0E+05	6,1E+06	3,2E+04	9,3E+11	5,3E+01	2,4E-03	4,4E+05	1,0E+07	2,1E+05		
2004-02-06	2,E+06	16000	1710	1,3E+13	1,4E+02	3,1E-03	8,1E+05	8,7E+06	7,6E+03	2,6E+12	3,9E+01	2,3E-02	7,5E+06	6,7E+07	2,8E+05		
2004-02-06	6,E+05	16010	1840	1,2E+13	2,2E+02	8,9E-04	1,3E+05	2,6E+06	2,4E+03	3,5E+12	1,2E+02	2,5E-03	2,3E+05	1,1E+07	3,5E+04		
2004-02-19	8,E+06	17850	2090	2,0E+13	1,7E+02	1,9E-03	3,3E+05	2,6E+07	1,4E+04	8,6E+12	1,3E+02	4,2E-03	3,5E+05	6,5E+07	8,3E+04		
2004-03-02	7,0E+05	17291	-30	1,7E+12	4,2E+01	2,2E-03	5,1E+05	8,2E+06	2,7E+04	8,3E+11	2,1E+01	1,3E-02	2,0E+06	5,4E+07	3,6E+05		
2004-03-10	5,E+07	17790	2240	3,9E+13	2,6E+02	1,9E-03	2,3E+05	2,7E+07	7,8E+03	3,2E+13	1,9E+02	9,3E-03	5,6E+05	3,8E+08	1,3E+05		
2004-03-13	9,0E+06	17342	-138	1,3E+13	8,0E+01	6,3E-03	8,1E+05	5,3E+07	2,3E+04	7,4E+12	3,0E+01	8,8E-02	1,1E+07	1,4E+09	1,0E+06		
2004-03-20	9,E+06	17850	2290	5,0E+13	2,9E+02	1,9E-03	2,1E+05	3,1E+07	6,8E+03	2,2E+13	1,4E+02	1,2E-02	9,6E+05	2,7E+08	1,3E+05		
2004-03-24	8,0E+06	17183	88	1,4E+13	6,2E+01	1,1E-02	1,7E+06	1,3E+08	5,3E+04	4,2E+12	4,2E+01	2,1E-02	1,7E+06	5,1E+08	6,7E+05		
2004-03-29	8,E+07	17770	2310	7,2E+13	2,9E+02	2,5E-03	2,6E+05	7,9E+07	1,2E+04	3,3E+13	1,6E+02	1,1E-02	7,3E+05	3,7E+08	1,2E+05		
2004-04-09	2,0E+06	17296	-156	8,6E+12	5,3E+01	6,7E-03	1,2E+06	3,8E+07	2,4E+04	2,4E+12	2,9E+01	1,7E-02	1,9E+06	1,2E+08	2,8E+05		
2004-04-16	9,0E+05	17256	-171	1,5E+12	2,6E+01	3,3E-03	1,0E+06	1,4E+07	5,0E+04	6,3E+11	1,4E+01	1,4E-02	2,9E+06	2,5E+08	2,2E+06		
2004-04-23	1,E+06	15430	3810	7,0E+12	1,5E+02	8,2E-04	1,6E+05	4,5E+06	7,1E+03	3,0E+12	9,4E+01	2,4E-03	2,5E+05	3,1E+07	1,2E+05		
2004-04-29	8,0E+05	17315	157	2,8E+12	4,3E+01	2,1E-03	4,0E+05	9,7E+06	1,9E+04	2,1E+12	1,9E+01	2,5E-02	3,8E+06	3,4E+08	8,9E+05		
2004-05-11	5,0E+06	17524	36	8,5E+12	4,8E+01												

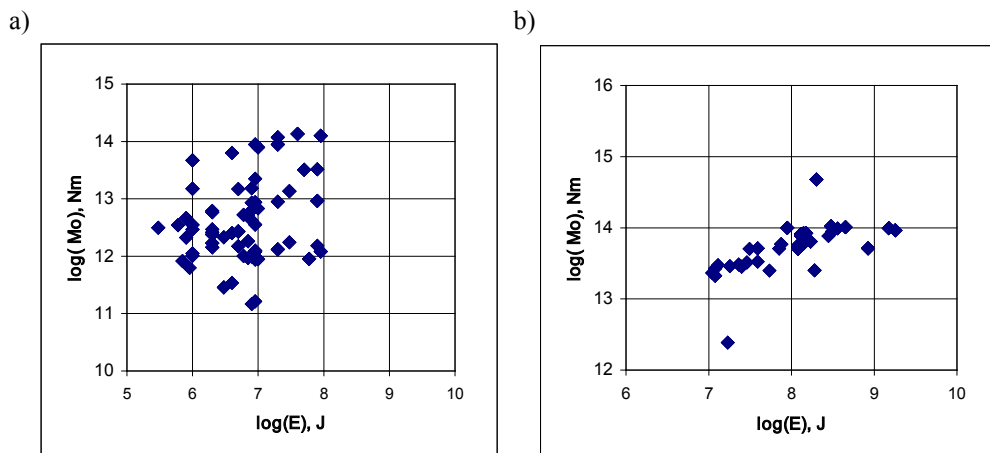
Tablica 4.2. Parametry źródła dla analizowanych wstrząsów – obszar LGOM

Data	Energia J	x, m	y, m	Fala S							Fala P						
				moment sejsmiczny Nm	promień ogniska m	przesunięcie w ognisku, m	spadek naprężeń Pa	energia spektralna J	naprężenia poziome Pa	moment sejsmiczny Nm	promień ogniska m	przesunięcie w ognisku m	spadek naprężeń Pa	energia spektralna J	naprężenia poziome Pa		
01-02-13	7,1E+07	29750	6201	2,7E+14	2,0E+02	7,3E-03	1,0E+06	1,8E+09	7,4E+04	5,1E+13	1,4E+02	8,5E-03	5,8E+05	1,8E+10	3,0E+06		
01-10-19	1,7E+08	31800	5474	2,8E+14	2,1E+02	6,7E-03	8,5E+05	2,5E+09	9,5E+04	6,4E+13	1,6E+02	7,3E-03	4,3E+05	7,7E+10	9,2E+06		
01-10-30	1,4E+08	33287	8334	3,2E+14	1,9E+02	6,3E-03	7,3E+05	4,8E+10	1,2E+06	6,0E+13	1,3E+02	7,5E-03	4,3E+05	4,8E+11	6,4E+07		
02-02-16	4,5E+08	32794	8464	3,1E+14	1,9E+02	6,0E-03	6,6E+05	1,8E+11	4,5E+06	1,0E+14	1,4E+02	1,0E-02	5,0E+05	2,9E+12	2,1E+08		
02-02-20	1,5E+09	30131	6168	3,7E+14	2,1E+02	9,9E-03	1,4E+06	1,2E+10	3,0E+05	9,9E+13	1,5E+02	1,8E-02	1,3E+06	9,4E+12	7,3E+08		
02-04-28	1,9E+08	29053	6446	2,5E+13	1,4E+02	1,4E-03	2,9E+05	7,4E+07	2,6E+04	2,5E+13	8,5E+01	1,5E-02	1,8E+06	6,1E+11	3,7E+08		
02-07-02	1,9E+08	30800	6392	3,3E+14	2,2E+02	6,6E-03	8,2E+05	7,5E+09	2,3E+05	5,4E+13	1,7E+02	4,1E-03	2,4E+05	1,8E+10	2,5E+06		
02-08-26	3,1E+07	32507	4501	2,5E+14	1,9E+02	6,6E-03	1,0E+06	3,0E+09	1,2E+05	5,1E+13	1,3E+02	7,4E-03	5,8E+05	9,3E+10	1,3E+07		
02-09-17	2,0E+08	33062	8261	1,3E+15	1,4E+02	1,4E-01	2,9E+07	1,9E+12	8,5E+06	4,8E+14	1,5E+02	1,7E-01	1,3E+07	2,0E+12	2,4E+07		
02-09-30	1,1E+07	30686	6248	1,8E+14	1,7E+02	7,3E-03	1,2E+06	1,6E+09	9,3E+04	2,3E+13	1,4E+02	3,6E-03	2,4E+05	2,7E+10	8,1E+06		
02-10-10	2,8E+08	29473	7494	3,7E+14	2,2E+02	7,7E-03	1,0E+06	1,0E+10	2,4E+05	7,7E+13	2,1E+02	6,1E-03	3,2E+05	1,3E+10	1,3E+06		
02-11-25	5,4E+07	30835	6421	2,1E+14	1,7E+02	8,4E-03	1,4E+06	3,8E+09	1,7E+05	2,5E+13	1,3E+02	4,2E-03	2,9E+05	4,2E+10	1,1E+07		
03-01-24	3,9E+07	30604	6380	2,1E+14	1,7E+02	8,1E-03	1,3E+06	5,6E+09	2,3E+05	3,3E+13	1,2E+02	6,6E-03	4,8E+05	1,4E+10	3,3E+06		
03-02-11	1,2E+07	30691	6338	2,0E+14	1,6E+02	8,5E-03	1,5E+06	1,1E+10	4,5E+05	2,7E+13	1,2E+02	6,3E-03	4,9E+05	1,6E+11	4,5E+07		
03-03-28	1,7E+08	30652	6326	2,8E+14	1,8E+02	8,7E-03	1,3E+06	1,2E+10	3,6E+05	6,4E+13	1,3E+02	1,1E-02	7,7E+05	4,0E+11	4,8E+07		
03-05-31	3,6E+08	34212	6582	2,9E+14	2,0E+02	5,6E-03	6,8E+05	3,6E+10	1,0E+06	9,8E+13	1,5E+02	1,1E-02	6,8E+05	4,0E+12	3,1E+08		
03-07-25	1,8E+07	31701	6353	1,9E+14	1,8E+02	5,4E-03	7,6E+05	7,6E+09	3,3E+05	2,9E+13	1,0E+02	6,2E-03	5,1E+05	5,4E+10	1,3E+07		
03-10-05	3,0E+08	31900	9500	4,5E+14	2,2E+02	7,4E-03	8,8E+05	6,1E+10	9,4E+05	8,8E+13	1,4E+02	1,8E-02	1,6E+06	3,2E+11	2,6E+07		
04-01-25	1,3E+08	28291	7266	4,3E+14	2,6E+02	6,5E-03	6,0E+05	7,8E+09	1,7E+05	8,2E+13	2,2E+02	4,6E-03	1,9E+05	1,2E+10	1,1E+06		
04-01-27	1,2E+08	32598	5100	3,0E+14	2,2E+02	6,4E-03	8,3E+05	7,6E+09	2,2E+05	5,7E+13	1,7E+02	4,9E-03	2,7E+05	1,6E+10	2,0E+06		
04-02-15	1,9E+08	28650	7700	1,8E+13	1,2E+02	1,5E-03	3,7E+05	6,9E+07	4,0E+04	2,4E+12	9,5E+01	8,1E-04	7,7E+04	2,5E+09	8,3E+06		
04-04-17	1,0E+07	24964	6429	4,4E+13	2,3E+02	2,3E-03	1,1E+06	9,5E+08	1,9E+05	2,9E+13	1,3E+02	1,6E-03	1,2E+05	1,3E+11	9,5E+06		
04-05-09	2,9E+07	30571	6462	2,0E+14	1,7E+02	7,6E-03	1,2E+05	2,4E+09	1,2E+05	3,3E+13	1,5E+02	4,3E-03	2,5E+05	1,3E+10	2,9E+06		
04-05-16	8,9E+07	31400	5000	3,3E+14	2,1E+02	7,7E-03	1,0E+06	1,5E+10	3,9E+05	5,1E+13	1,6E+02	6,3E-03	4,0E+05	1,1E+11	1,6E+07		
04-06-07	1,2E+07	30774	6634	1,9E+14	2,0E+02	5,3E-03	7,1E+05	9,8E+08	5,6E+04	2,1E+13	1,5E+02	3,0E-03	1,8E+05	2,5E+10	8,8E+06		
04-06-16	2,1E+07	30832	6674	5,4E+13	2,4E+02	1,7E-03	8,1E+05	8,5E+08	1,9E+04	7,9E+12	1,6E+02	1,7E-03	1,6E+05	5,3E+10	7,5E+06		
04-06-20	1,4E+08	28600	7300	3,8E+14	2,5E+02	7,1E-03	8,0E+05	5,9E+09	1,4E+05	8,4E+13	2,4E+02	5,2E-03	2,2E+05	3,8E+10	3,2E+06		
04-08-25	1,3E+08	27449	8778	3,7E+14	2,7E+02	6,5E-03	7,3E+05	2,7E+09	7,5E+04	7,7E+13	2,4E+02	4,4E-03	1,9E+05	4,9E+09	4,6E+05		
04-08-29	7,5E+07	28800	7100	2,7E+14	2,3E+02	6,1E-03	7,7E+05	2,1E+09	7,6E+04	5,9E+13	1,9E+02	5,5E-03	2,9E+05	2,8E+10	3,4E+06		
04-09-02	1,8E+09	31958	9150	3,9E+14	2,1E+02	7,7E-03	8,5E+05	6,0E+10	1,2E+06	9,3E+13	1,8E+02	6,6E-03	2,8E+05	3,8E+11	3,0E+07		
04-09-09	1,5E+08	29462	7464	4,0E+14	2,3E+02	8,7E-03	1,0E+06	1,0E+10	2,2E+05	8,4E+13	1,8E+02	8,4E-03	4,2E+05	1,5E+11	1,3E+07		
04-11-09	2,4E+07	36637	7306	2,1E+14	2,7E+02	7,5E-03	2,2E+05	5,4E+09	1,7E+05	7,3E+12	1,3E+02	4,1E-03	2,6E+05	1,3E+10	2,7E+06		
04-09-26	2,3E+07	33146	8152	1,7E+14	2,0E+02	2,8E-03	3,0E+05	1,8E+10	8,3E+05	3,0E+13	2,0E+02	1,4E-03	5,4E+04	5,5E+10	1,1E+07		
04-10-09	3,0E+08	30400	10350	3,5E+14	2,1E+02	8,0E-03	1,0E+06	3,1E+10	7,6E+05	1,0E+14	1,8E+02	1,1E-02	6,4E+05	4,6E+11	3,4E+07		
04-11-06	1,2E+08	30907	6766	3,1E+14	2,0E+02	7,3E-03	9,3E+05	1,4E+10	3,6E+05	5,1E+13	1,3E+02	8,1E-03	5,2E+05	1,5E+12	2,2E+08		
04-11-18	3,9E+07	33302	8139	2,5E+14	1,7E+02	5,9E-03	7,5E+05	3,9E+10	1,2E+06	5,1E+13	1,6E+02	3,7E-03	1,7E+05	1,7E+11	2,3E+07		
04-11-27	3,0E+07	30550	6700	2,6E+14	1,8E+02	6,2E-03	1,0E+06	3,5E+09	1,3E+05	5,4E+13	1,4E+02	5,4E-03	2,8E+05	9,5E+10	1,5E+07		
04-12-16	1,3E+07	35047	9489	1,7E+14	2,1E+02	2,8E-03	3,4E+05	4,4E+10	1,9E+06	3,0E+13	1,9E+02	2,2E-03	1,3E+05	4,0E+10	9,5E+06		
04-12-19	2,5E+07	29763	7099	1,8E+14	2,0E+02	4,9E-03	6,6E+05	1,3E+09	6,4E+04	2,8E+13	1,7E+02	3,1E-03	1,7E+05	1,3E+10	3,0E+06		

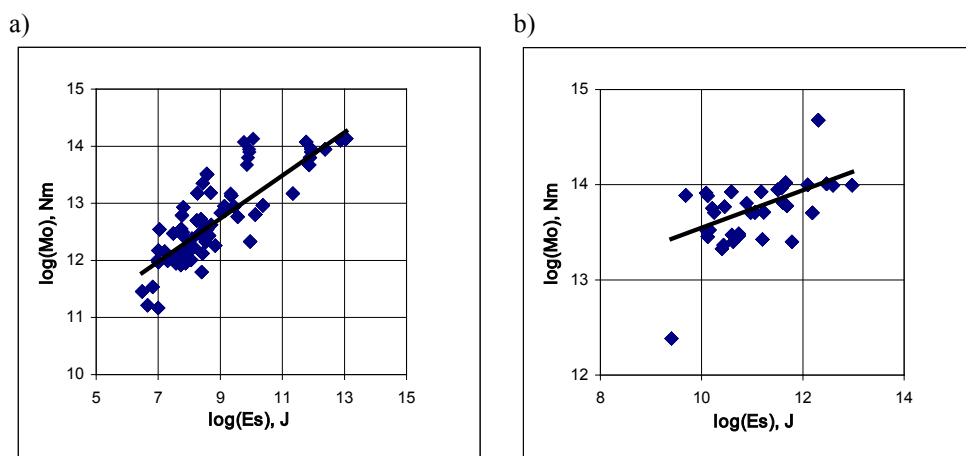
Otrzymane w wyniku analizy spektralnej wartości parametrów źródła były podstawą do określenia relacji między nimi – tzw. relacji skalowania.

Określono zależność momentu sejsmicznego od energii sejsmicznej wstrząsów obliczonej przez kopalniane stacje seismologiczne (rys. 4.3) oraz od energii

spektralnej obliczonej z momentu sejsmicznego (rys. 4.4). W pierwszym przypadku nie można było stwierdzić korelacji między tymi parametrami zarówno w przypadku danych z GZW, jak i danych z LGOM, natomiast w drugim wystąpiła pewna korelacja momentu sejsmicznego z energią spektralną dla wstrząsów z GZW. Przyczyną braku lepszej korelacji dla danych obszaru LGOM mógł być zbyt wąski zakres momentu sejsmicznego 10^{12} – 10^{14} Nm, gdyż analizowane wstrząsy należały do najsilniejszych zjawisk sejsmicznych.



Rys. 4.3. Zależność między momentem sejsmicznym M_0 a energią sejsmiczną E : a – wstrząsy w GZW, b – wstrząsy w LGOM

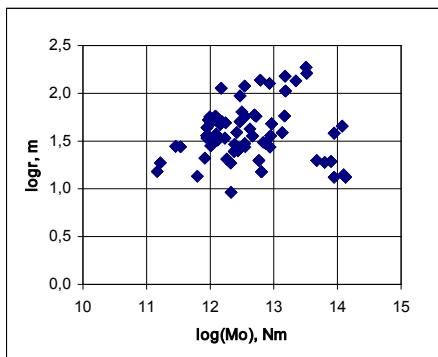


Rys. 4.4. Zależność między momentem sejsmicznym M_0 a energią spektralną E_s : a – wstrząsy w GZW, $\log M_0 = 0,38 \log E_s + 9,34$, współczynnik korelacji $R = 0,85$; b – wstrząsy w LGOM, $\log M_0 = 0,20 \log E_s + 11,58$, współczynnik korelacji $R = 0,55$

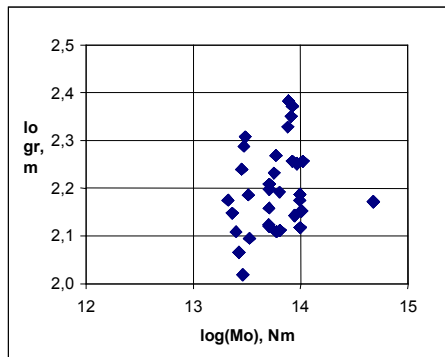
Zależność między promieniem ogniska i momentem sejsmicznym przedstawiono na rysunku 4.5. Wynika z niego, że dla analizowanego zbioru silnych wstrząsów

wielkość promienia ogniska nie zależy od momentu sejsmicznego, co oznacza, że spadek naprężeń nie jest stały zarówno dla wstrząsów z obszaru GZW, jak i LGOM.

a)



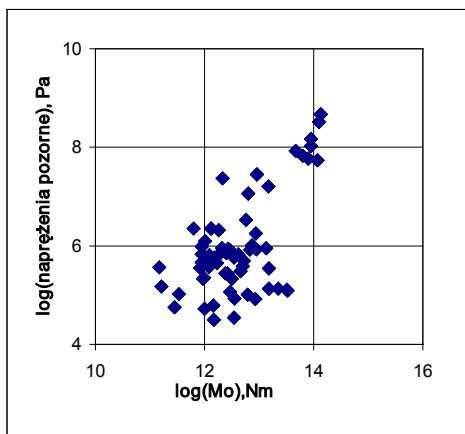
b)



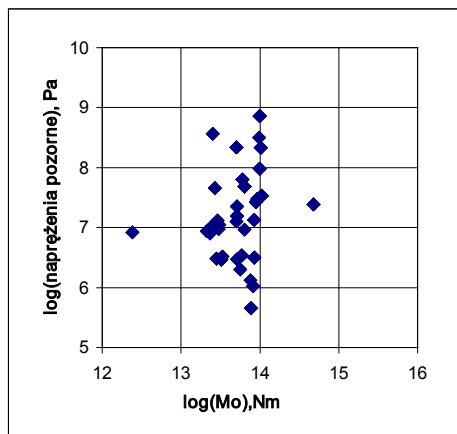
Rys. 4.5. Zależność między promieniem ogniska r_0 i momentem sejsmicznym M_0 : a – wstrząsy w GZW, b – wstrząsy w LGOM

W przypadku analizowanych danych nie zaobserwowano również korelacji między naprężeniami pozornymi będącymi miarą rozładowania naprężeń w górotworze a momentem sejsmicznym (rys. 4.6).

a)

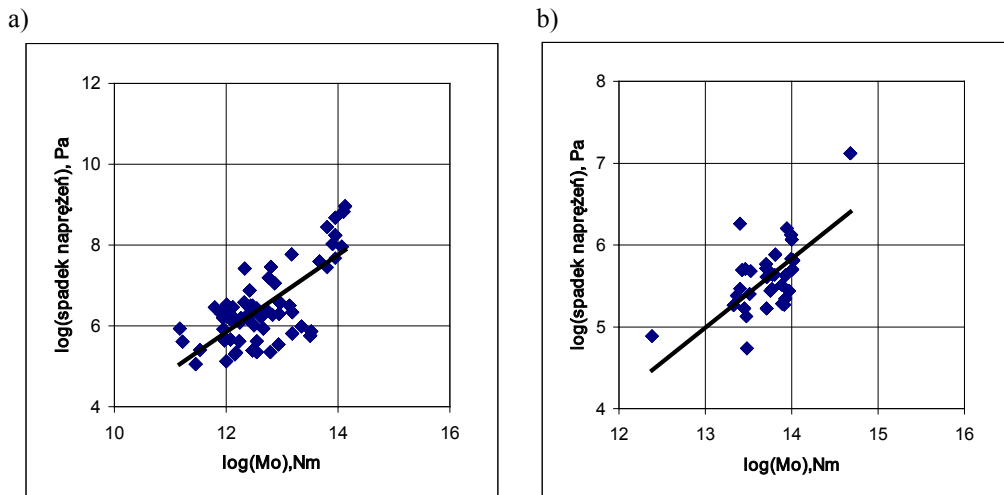


b)

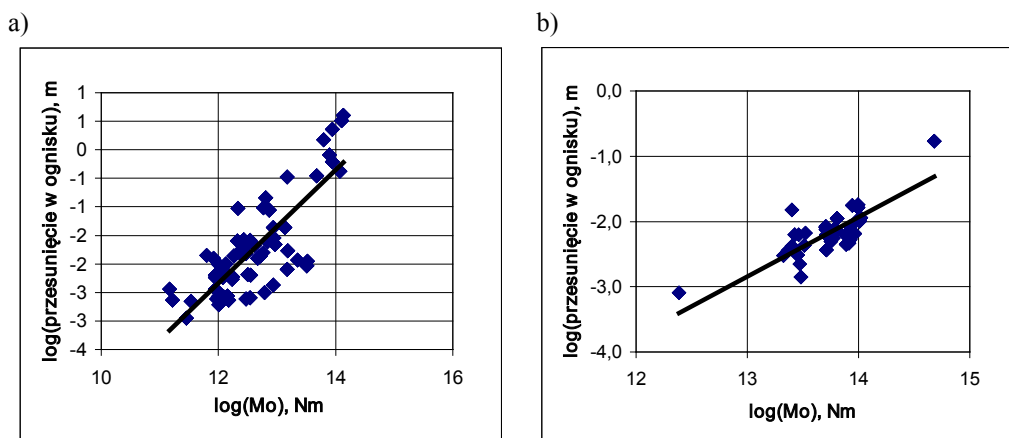


Rys. 4.6. Zależność naprężeń pozornych δ_a od momentu sejsmicznego M_0 : a – wstrząsy w GZW, b – wstrząsy w LGOM

Wystąpiła natomiast widoczna zależność dynamicznego spadku naprężeń (rys. 4.7) i przesunięcia w ognisku (rys. 4.8) od momentu sejsmicznego. Dynamiczny spadek naprężeń (zwany również naprężeniem efektywnym) jest różnicą między naprężeniem początkowym i wartością tarcia kinetycznego na uskoku i reprezentuje jednolitą redukcję naprężenia ścinania w ognisku (Gibowicz 1989).



Rys. 4.7. Zależność dynamicznego spadku naprężeń $\Delta\sigma$ od momentu sejsmicznego M_0 : a – wstrząsy w GZW, $\log\Delta\sigma = 0,95 \log M_0 - 5,59$, współczynnik korelacji $R = 0,72$; b – wstrząsy w LGOM, $\log\Delta\sigma = 0,84 \log M_0 - 5,98$, współczynnik korelacji $R = 0,63$



Rys. 4.8. Zależność przesunięcia $\bar{D}$ w ognisku od momentu sejsmicznego M_0 : a – wstrząsy w GZW, $\log \bar{D} = 0,99 M_0 - 14,23$, współczynnik korelacji $R = 0,82$; b – wstrząsy w LGOM, $\log \bar{D} = 0,91 M_0 - 14,69$, współczynnik korelacji $R = 0,79$

Moment sejsmiczny jest miarą wielkości wstrząsu niezależną od energii sejsmicznej i dlatego dla parametrów źródła, które zależą od momentu sejsmicznego, podjęto próbę określenia zależności regresyjnych dla przyspieszeń drgań gruntu a_{zr} według wzoru (4.8). Na rysunkach 4.9a–4.12a przedstawiono zależności dla danych z GZW, a na rysunkach 4.9b–4.12b – zależności dla danych z LGOM wraz z zależnościami funkcyjnymi dla poszczególnych parametrów źródła. We wszystkich przypadkach uzyskano współczynnik korelacji R większy od 0,8, co oznacza, że do

opisu intensywności wstrząsów na powierzchni można wykorzystać, oprócz dotychczas stosowanych zależności funkcyjnych między przyspieszeniem drgań a energią sejsmiczną liczoną z prędkości amplitudy drgań i odległości epicentralnej (Mutke 1991), także dodatkowe parametry, które dobrze charakteryzują ognisko wstrząsu. Uzyskane zależności funkcyjne przedstawiają się następująco:

- Zależność przyspieszeń drgań gruntu a_{zr} od momentu sejsmicznego M_0 i od odległości epicentralnej d :

– dla wstrząsów w GZW

$$\log a_{zr} = 1,649 + 0,057 \log M_0 - 0,71 \log d \quad (4.9)$$

– dla wstrząsów w LGOM

$$\log a_{zr} = 0,67 + 0,099 \log M_0 - 0,84 \log d \quad (4.10)$$

- Zależność przyspieszeń drgań gruntu a_{zr} od energii spektralnej E_s i od odległości epicentralnej d :

– dla wstrząsów w GZW

$$\log a_{zr} = 1,913 + 0,082 \log E_s - 0,71 \log d \quad (4.11)$$

– dla wstrząsów w LGOM

$$\log a_{zr} = 2,594 + 0,114 \log E_s - 0,85 \log d \quad (4.12)$$

- Zależność przyspieszeń drgań gruntu a_{zr} od spadku naprężeń $\Delta\sigma$ i od odległości epicentralnej d :

– dla wstrząsów w GZW

$$\log a_{zr} = 1,763 + 0,109 \log \Delta\sigma - 0,71 \log d \quad (4.13)$$

– dla wstrząsów w LGOM

$$\log a_{zr} = 2,12 + 0,108 \log \Delta\sigma - 0,81 \log d \quad (4.14)$$

- Zależność przyspieszeń drgań gruntu a_{zr} od średniego przesunięcia w ognisku $\bar{D}$ i od odległości epicentralnej d :

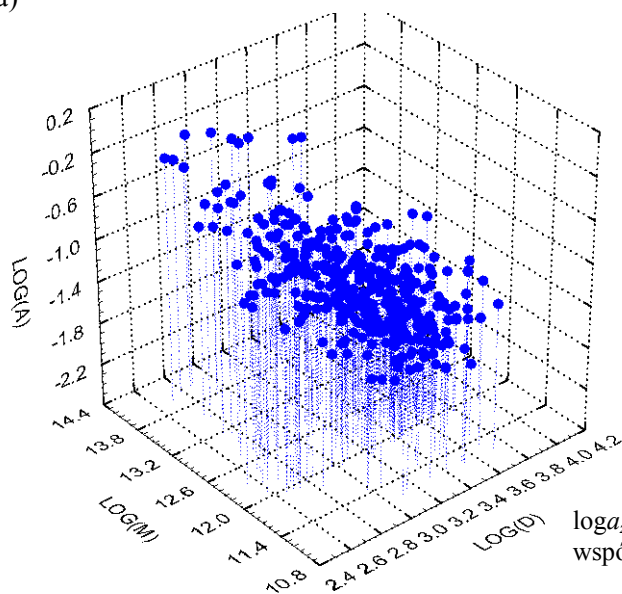
– dla wstrząsów w GZW

$$\log a_{zr} = 2,176 + 0,097 \log \bar{D} - 0,7 \log d \quad (4.15)$$

– dla wstrząsów w LGOM

$$\log a_{zr} = 3,64 + 0,110 \log \bar{D} - 0,82 \log d \quad (4.16)$$

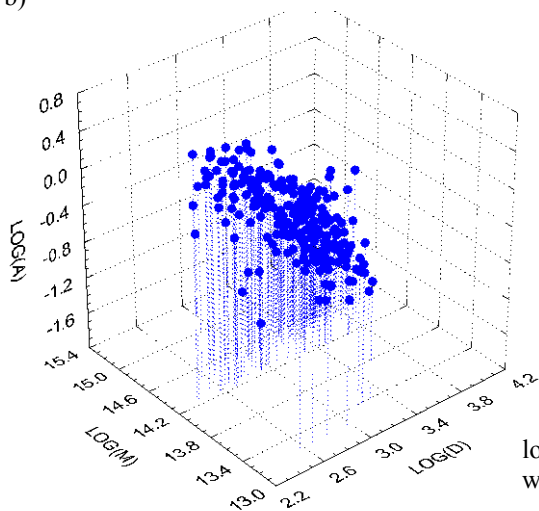
a)



$$\log a_{zr} = 1,649 + 0,057 \log M_0 - 0,71 \log d$$

współczynnik korelacji $R = 0,78$

b)

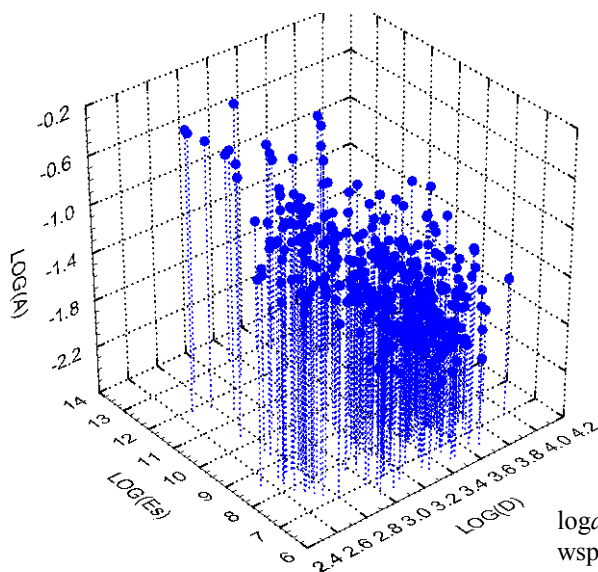


$$\log a_{zr} = 0,67 + 0,099 \log M_0 - 0,84 \log d$$

współczynnik korelacji $R = 0,82$

Rys. 4.9. Zależność przyspieszeń drgań gruntu a_{zr} od momentu sejsmicznego M_0 i od odległości epicentralnej d : a – wstrząsy w GZW, b – wstrząsy w LGOM

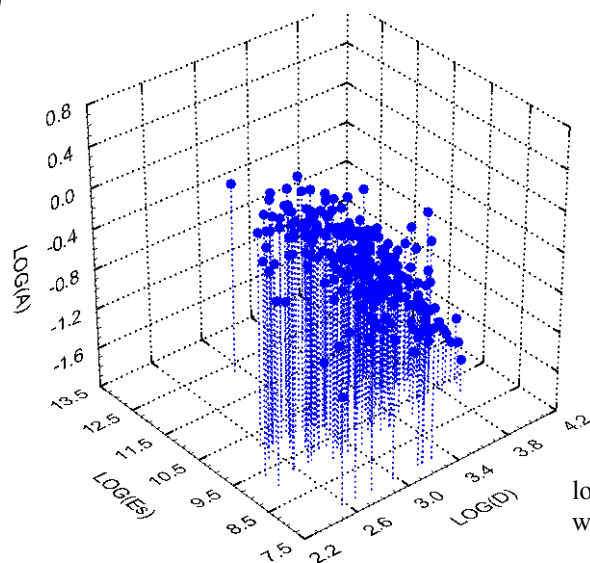
a)



$$\log a_{zr} = 1,913 + 0,082 \log E_s - 0,71 \log d$$

współczynnik korelacji $R = 0,79$

b)

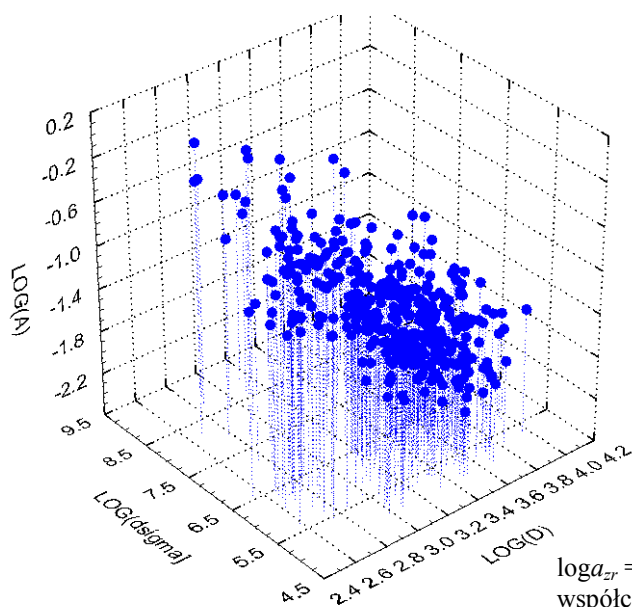


$$\log a_{zr} = 2,594 + 0,114 \log E_s - 0,85 \log d$$

współczynnik korelacji $R = 0,84$

Rys. 4.10. Zależność przyspieszeń drgań gruntu a_{zr} od energii spektralnej E_s i od odległości epicentralnej d : a – wstrząsy w GZW, b – wstrząsy w LGOM

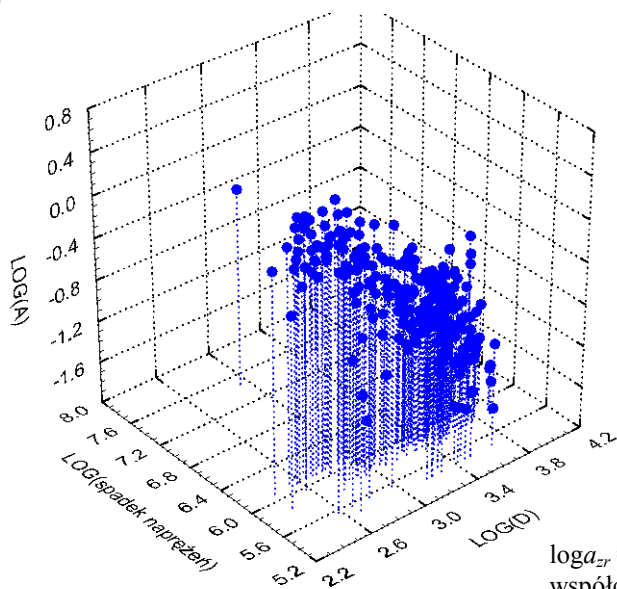
a)



$$\log a_{zr} = 1,763 + 0,109 \log \Delta\sigma - 0,71 \log d$$

współczynnik korelacji $R = 0,76$

b)

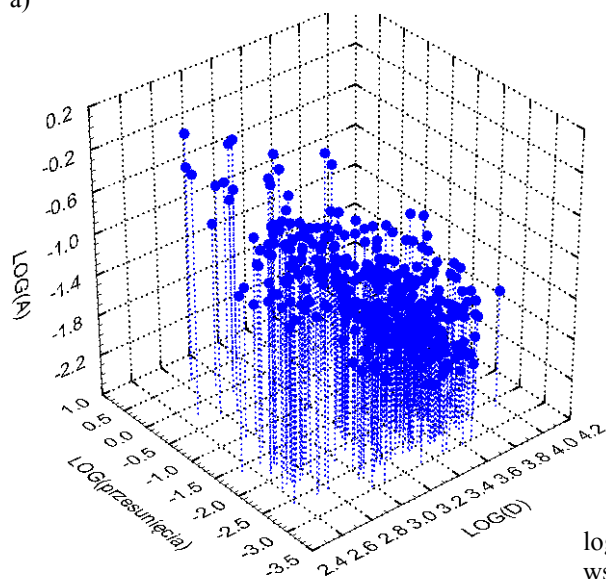


$$\log a_{zr} = 2,12 + 0,108 \log \Delta\sigma - 0,81 \log d$$

współczynnik korelacji $R = 0,84$

Rys. 4.11. Zależność przyspieszeń drgań gruntu a_{zr} od spadku naprężeń $\Delta\sigma$ i od odległości epicentralnej d : a – wstrząsy w GZW, b – wstrząsy w LGOM

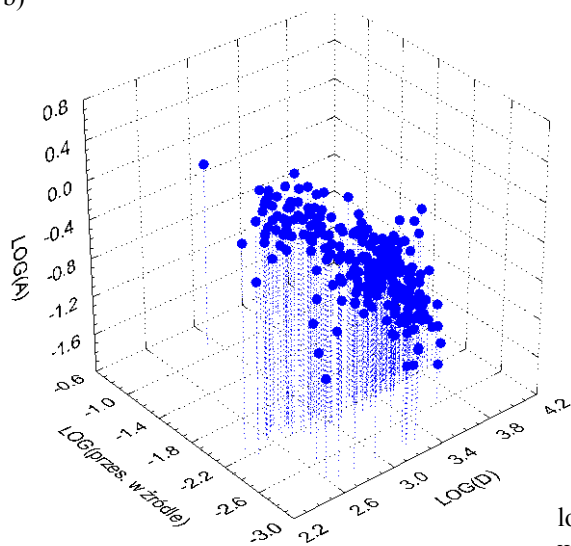
a)



$$\log a_{zr} = 2,176 + 0,097 \log \bar{D} - 0,7 \log d$$

współczynnik korelacji $R = 0,75$

b)



$$\log a_{zr} = 3,64 + 0,110 \log \bar{D} - 0,82 \log d$$

współczynnik korelacji $R = 0,82$

Rys. 4.12. Zależność przyspieszeń drgań gruntu a_{zr} od średniego przesunięcia w ognisku $\bar{D}$ i od odległości epicentralnej d : a – wstrząsy w GZW, b – wstrząsy w LGOM

5. Mechanizm ognisk wstrząsów

5.1. Ogólna charakterystyka metody tensora momentu sejsmicznego

Wstrząsy górnicze są generowane w wyniku działania określonych sił na strukturę ośrodka skalnego. Fakt ten powoduje charakterystyczny rozwój procesów dynamicznych, przejawiający się w różnicach mechanizmu ogniska i znajduje bezpośrednie odzwierciedlenie w charakterystyce promieniowania sejsmicznego oraz pośrednio w sejsmogramach rejestrowanych wstrząsów. Proces pęknięcia ośrodka skalnego można opisać na podstawie parametrów charakteryzujących mechanizm ognisk wstrząsów, które są obliczane metodą pierwszych wychyleń fali P (metoda klasyczna) lub metodą inwersji tensora momentu sejsmicznego (Aki, Richards 1980). Oceniając te metody należy stwierdzić, że metoda inwersji tensora momentu sejsmicznego jest bardziej dokładniejszym rozwiązaniem, umożliwiającym szersze rozpoznanie procesów zachodzących w ognisku wstrząsu. Metoda ta oraz wyniki pierwszych badań wstrząsów górniczych w Polsce, przy jej zastosowaniu, zostały opisane przez Gibowicza i Wiejacza (1994). Od tego czasu są prowadzone coraz szersze badania z wykorzystaniem większej bazy zjawisk sejsmicznych indukowanych eksploatacją górnictw (Gibowicz 1996; Wiejacz 1995; Gibowicz i inni 1996; Domański 1997; Dubiński i inni 1999; Dubiński i Stec 2000; Król 1999; Stec i Drzewiecki 2000, Stec 2005).

Tensor momentu sejsmicznego został po raz pierwszy zdefiniowany w 1970 roku przez Gilberta (Gilbert 1970). Opisuje on układ sił równoważnych $f(x, t)$ za pomocą potencjału tensorowego, gdzie x – oznacza położenie a t – czas dla źródła punktowego.

Tensor momentu sejsmicznego określa ruch ośrodka (przemieszczenie i kierunek tego przemieszczenia) w trzech głównych kierunkach względem źródła wstrząsu. Ogólny system sił reprezentujących źródło sejsmiczne można wyrazić jako liniową kombinację par sił z momentem. Wówczas pole przemieszczeń wywołane przez ten system jest sumą przemieszczeń wywołanych przez poszczególne pary sił.

$$u_k(x, t) = M_{ij} [G_{ki,j} s(t)]$$

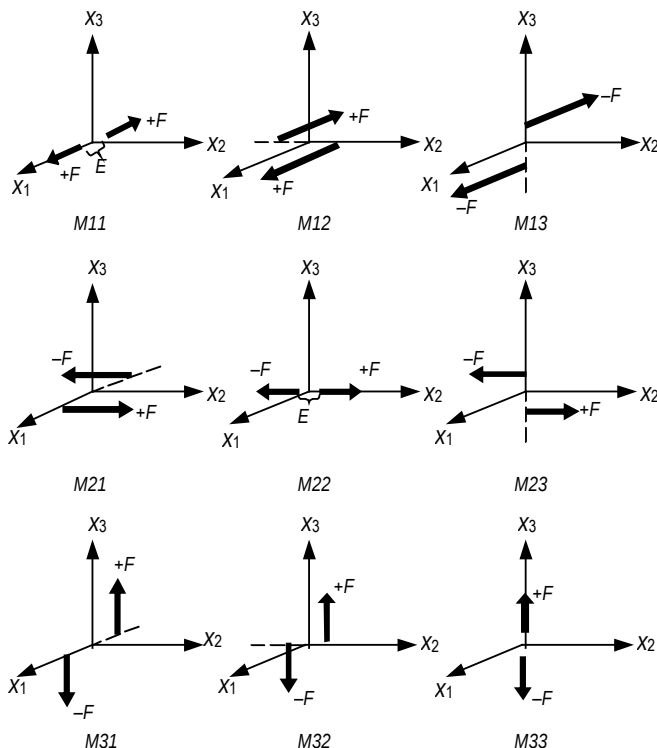
gdzie:

- $u_k(x, t)$ – pole przemieszczeń opisane w przestrzeni x i czasie t ,
- M_{ij} – tensor momentu sejsmicznego,
- $G_{ki,j}$ – funkcja Greena (odpowiedź ośrodka na impuls jednostkowy – charakteryzuje efekt propagacji fal sejsmicznych w danym ośrodku),
- $s(t)$ – czasowa funkcja źródła.

M_{ij} nazywa się tensorem momentu sejsmicznego źródła, ma dziewięć składowych i może być reprezentowany przez macierz M o wymiarach 3×3 o składowych M_{ij} .

$$M = \begin{vmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{vmatrix}$$

Graficznie obraz kombinacji kierunków i ramienia siły dla tensora momentu sejsmicznego M_{ij} pokazano na rysunku 5.1.



Rys. 5.1. Układ dziewięciu możliwych par sił równoważnych M_{ij} działających w ognisku sejsmicznym ($i = j$ dipole bez momentu; $i \neq j$ dipole z momentem)

Tensor M można rozłożyć na trzy tensory składowe M_1 , M_2 , M_3 , co nazywa się dekompozycją tensora:

$$M_1 = \begin{vmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 \\ 0 & 0 & a \end{vmatrix} \quad M_2 = \begin{vmatrix} 0 & b_3 & -b_2 \\ -b_3 & 0 & b_1 \\ b_2 & -b_2 & 0 \end{vmatrix} \quad M_3 = \begin{vmatrix} c_1 & c_2 & c_3 \\ c_2 & c_4 & c_5 \\ c_3 & c_5 & -c_4 \end{vmatrix}$$

Tensor M_1 określa zmiany objętościowe w źródle (zmiany implozyjne lub eksplozyjne – część izotropowa). Tensor M_2 odpowiada obrotowi w źródle w obrębie nieruchomego ośrodka, co nie ma fizycznego uzasadnienia. Tensor M_3 można rozłożyć na dwa tensory – jeden nazywany skompensowanym liniowym dipolem wektorowym

i drugi odpowiadający ruchowi przesuwczemu powstającemu w wyniku działania podwójnej pary sił. Tak więc dekompozycja tensora momentu sejsmicznego na część izotropową, na liniowy skompensowany dipol i na podwójną parę sił, jest najczęściej przyjmowanym opisem źródła sejsmicznego. Eksplozyjny lub implozyjny model ogniska odpowiada procesom objętościowego niszczenia struktury ośrodka (np. wstrząsy występujące po strzelaniach wstrząsowych lub w pokładzie). Liniowy skompensowany dipol wektorowy odpowiada w przybliżeniu jednoosiowemu ściskaniu lub rozciąganiu. Modelem tym opisywano nagłe przemiany fazowe w ogniskach głębokich trzęsień lub pękania skał związane z rozciąganiem w obecności płynów pod wysokim ciśnieniem. Źródło sejsmiczne reprezentowane przez liniowy skompensowany dipol wektorowy może wyjaśnić jeden z mechanizmów, obserwowanych *in situ*, wstrząsów górniczych w obszarze filarów ochronnych w głębokich kopalniach złota w Afryce Południowej. Z kolei mechanizm opisany podwójną parą sił odpowiada wstrząsom związanym z pękaniem skał stropowych lub występujących w strefach uskoku.

Proces obliczenia poszczególnych składowych tensora momentu sejsmicznego, na podstawie rejestracji – sejsmogramów, nazywa się jego inwersją. Stosując metodę inwersji tensora momentu sejsmicznego otrzymuje się informacje o procentowym udziale poszczególnych składowych w mechanizmie ogniska wstrząsu (Wiejacz 1994). Fakt ten pozwala na ustalenie dominującego typu procesu w ognisku wstrząsu powodującego jego zaistnienie.

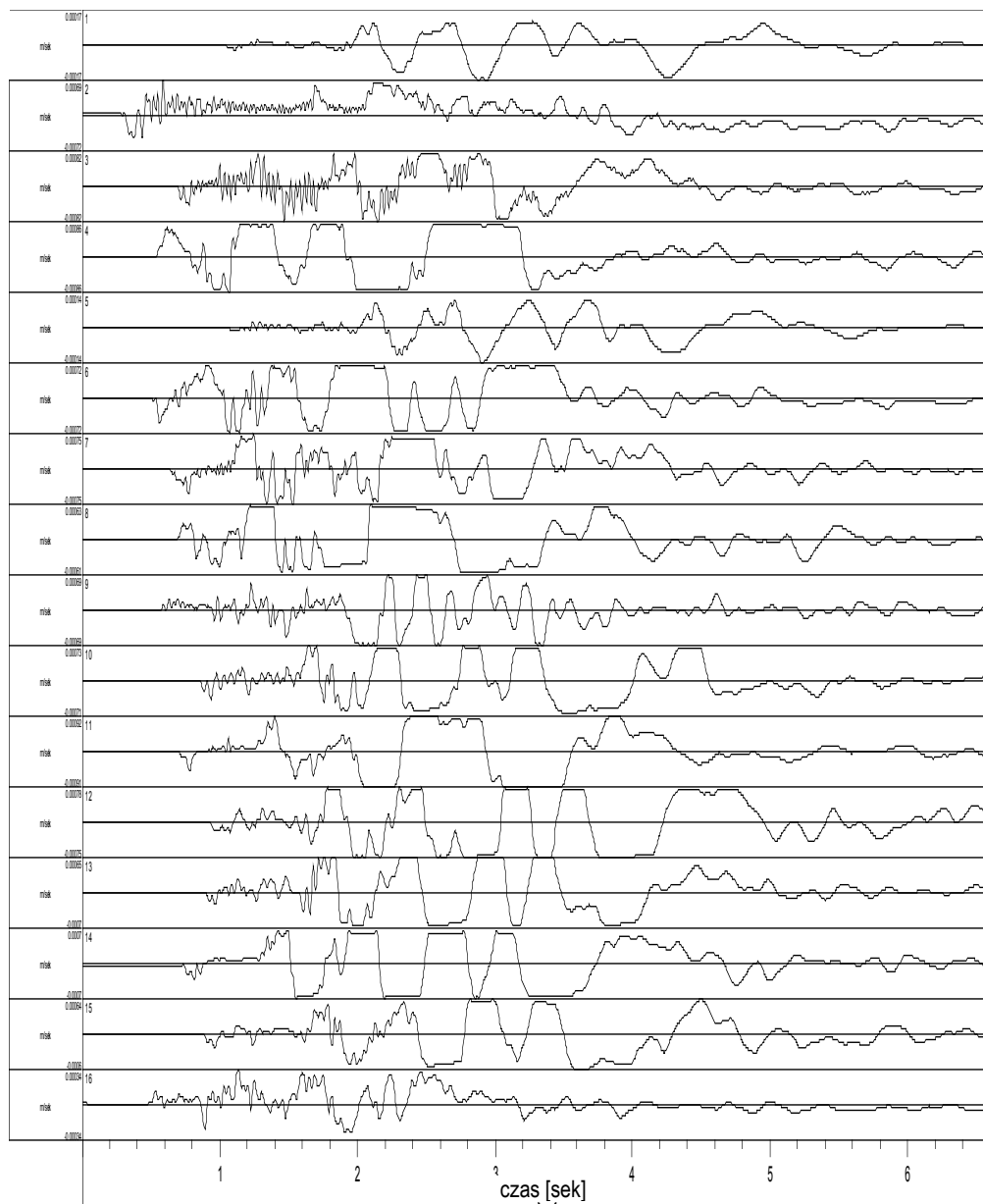
Tak więc w wyniku obliczeń uzyskuje się tzw. tensor ogólny ze składową izotropową Expl. opisującą zmiany objętości w ognisku (eksplozja (+) lub implozja (-); składową CLVD odpowiadającą jednoosiowemu ściskaniu (-) lub rozciąganiu (+) i składową ścinającą DBCP opisaną przez podwójną parę sił. W praktyce, oprócz tensora ogólnego, można obliczać tensor dewiatoryczny (zmiana postaci bez zmiany objętości) mający składową CLVD oraz składową ścinającą DBCP oraz tensor czystego ścinania, mający tylko składową DBCP – ścinającą. W przeprowadzonych badaniach obliczano tensor ogólny, a więc jego trzy składowe, stosując specjalistyczny program SMT (Wiejacz 1994).

5.2. Wyniki analizy mechanizmu ognisk wstrząsów w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym

Obliczenia mechanizmu ognisk wstrząsów przeprowadzono dla zbioru wstrząsów wyszczególnionych w rozdziale 3, dla których niezbędne dane wejściowe uzyskano ze stanowisk sejsmologicznych zlokalizowanych w rejonie poligonu pomiarowego usytuowanego w sąsiedztwie aktywnego sejsmicznie uskoku Kłodnickiego. Były to wstrząsy wysokoenergetyczne ($E \geq 10^6$ J), które wystąpiły w kopalniach: „Halemba”, „Bielszowice”, „Śląsk” i „Polska-Wirek”. Podstawę obliczeń stanowiły 16-kanalowe cyfrowe rejestracje uzyskane z kopalnianych sieci sejsmologicznych. Przykład sejsmogramu wstrząsu przedstawiono na rysunku 5.2.

W wyniku obliczeń określano podstawowe parametry mechanizmu ognisk (położenie płaszczyzny pęknięcia w ognisku i osi naprężeń głównych) oraz, co było najbardziej istotne, w prowadzonych badaniach, procentowy udział poszczególnych elementów składowych mechanizmu, to jest składowej izotropowej (Expl.), liniowego

dipola skompensowanego (CLVD) i podwójnej pary sił (DBCP). Przykład pełnego rozwiązania mechanizmu ogniska dla kilku wstrząsów przedstawiono na rysunkach 5.3a–f, natomiast w tabelicy 5.1 zestawiono procentowy udział poszczególnych składowych mechanizmu ogniska, określony dla pełnego tensora momentu sejsmicznego oraz korelację rozciągłości płaszczyzn nodalnych z warunkami geologiczno-górnictwymi w rejonie występowania ognisk wstrząsów.

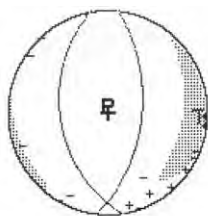


Rys. 5.2. Sejsmogram wstrząsu o energii sejsmicznej $8 \cdot 10^7$ J z dnia 24.07.2003, godz. 6:26

Stwierdzono dużą zmienność mechanizmów ognisk rejestrowanych wstrząsów w zależności od cech tektonicznych rejonu, położenia ogniska wstrząsu względem frontu eksploatacji i istniejących zaszczości eksploatacyjnych. Tym niemniej dla większości badanych wstrząsów w ich ogniskach dominowały procesy ścinania (udział składowej ścinającej od około 60 do 80%). Ponadto, dla zjawisk występujących w strefach uskokowych, można było zaobserwować dobrą korelację jednej z płaszczyzn nodalnych z rozciągłością struktur tektonicznych, natomiast w przypadku zjawisk występujących w pobliżu frontu eksploatacyjnego również występowała zgodność płaszczyzny nodalnej z linią frontu eksploatacyjnego. Świadczyć to może o oddziaływaniu zarówno uskoków, jak i frontu eksploatacyjnego na charakter mechanizmu ognisk wstrząsów. W kilku przypadkach, uzyskano dominację składowej izotropowej z dużym udziałem składowej eksplozyjnej lub implozyjnej dochodzących do 50%. Ten eksplozyjny typ ognisk oraz głębokość ich występowania wskazują, że w ognisku zachodziły procesy związane z destrukcją pokładu lub warstw położonych w stropie bezpośrednim.

Jednak głównym celem analizy mechanizmu ognisk wstrząsów było powiązanie uzyskanych parametrów mechanizmu ognisk z rozkładem przyspieszeń drgań na powierzchni w celu stwierdzenia, jaki jest ewentualny wpływ mechanizmu ogniska, pośrednio jego radiacji sejsmicznej na powyższy rozkład. Uzyskane zależności przedstawiono w kolejnym rozdziale.

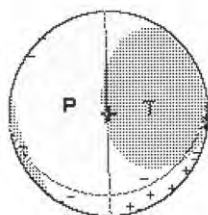
a) KWK Bielszowice 24-07-03 6:26 8,0E+07 J 17560 2060 -720



Full solution :

-.891E+14	.375E+14	-.337E+15
.375E+14	.427E+14	.299E+15
-.337E+15	.299E+15	-.270E+16

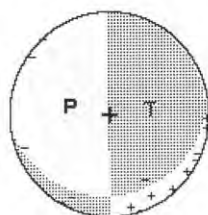
T0= .1340 M0= .196E+16 MT= .273E+16 ERR= .106E+14
 Expl.= -20.3% CLVD.= -19.3% DBCP.= 60.5% M= 4.2
 λ A= 6.04 δ A= 51.51 λ B= 171.39 δ B= 39.42
 P-axis: trend= 319.70 plunge= 80.53
 T-axis: trend= 89.48 plunge= 6.09
 B-axis: trend= 180.26 plunge= 7.22
 Quality index = 55.9 normal fault



Trace null solution :

-.635E+14	.404E+14	.280E+14
.404E+14	.266E+14	.168E+15
.280E+14	.168E+15	.369E+14

T0= .1340 M0= .137E+15 MT= .183E+15 ERR= .125E+14
 CLVD.= 51.5% DBCP.= 48.5% M= 3.4
 λ A= 178.59 δ A= 88.84 λ B= 83.54 δ B= 12.96
 P-axis: trend= 280.95 plunge= 42.44
 T-axis: trend= 75.75 plunge= 44.70
 B-axis: trend= 178.86 plunge= 12.91
 Quality index = 56.8 reverse fault

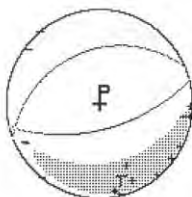


Double couple solution :

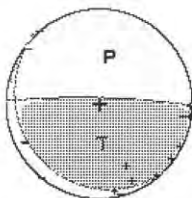
.150E+13	.305E+14	.391E+13
.305E+14	-.693E+13	.134E+15
.391E+13	.134E+15	.543E+13

T0= .1340 M0= .137E+15 MT= .137E+15 ERR= .138E+14
 DBCP.= 100.0% M= 3.4
 λ A= 178.59 δ A= 88.84 λ B= 83.54 δ B= 12.96
 P-axis: trend= 280.95 plunge= 42.44
 T-axis: trend= 75.75 plunge= 44.70
 B-axis: trend= 178.86 plunge= 12.91
 Quality index = 30.9 reverse fault

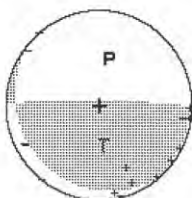
b) KWK Bielszowice 09-08-03 15:31 9,0E+07 J 17550 2260 -750



Full solution :
 -1.923×10^{13} -1.441×10^{13} -1.991×10^{14}
 -1.441×10^{13} -1.463×10^{12} 1.388×10^{13}
 -1.991×10^{14} 1.388×10^{13} -1.383×10^{15}
 $T0 = .1210$ $M0 = .289 \times 10^{15}$ $MT = .406 \times 10^{15}$ $ERR = .831 \times 10^{12}$
 $Expl. = -19.7\%$ $CLVD. = -19.4\%$ $DBCP. = 61.0\%$ $M = 3.6$
 $\delta A = 75.89$ $\delta A = 58.55$ $\delta B = 247.79$ $\delta B = 31.70$
P-axis: trend= 358.42 plunge= 76.05
T-axis: trend= 162.80 plunge= 13.46
B-axis: trend= 253.67 plunge= 3.62
Quality index = 56.1 normal fault

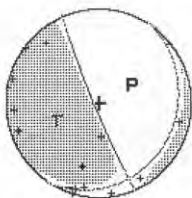


Trace null solution :
 -1.702×10^{13} -1.382×10^{13} -1.330×10^{14}
 -1.382×10^{13} -1.822×10^{12} -1.191×10^{12}
 -1.330×10^{14} -1.191×10^{12} 1.784×10^{13}
 $T0 = .1210$ $M0 = .337 \times 10^{14}$ $MT = .340 \times 10^{14}$ $ERR = .130 \times 10^{13}$
 $CLVD. = 2.0\%$ $DBCP. = 98.0\%$ $M = 3.0$
 $\delta A = 271.24$ $\delta A = 83.58$ $\delta B = 135.75$ $\delta B = 8.97$
P-axis: trend= 6.89 plunge= 38.27
T-axis: trend= 174.19 plunge= 51.04
B-axis: trend= 271.95 plunge= 6.23
Quality index = 60.1 reverse fault

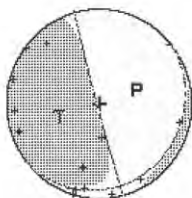


Double couple solution :
 -1.727×10^{13} -1.407×10^{13} -1.326×10^{14}
 -1.407×10^{13} -1.105×10^{12} 1.192×10^{11}
 -1.326×10^{14} 1.192×10^{11} 1.737×10^{13}
 $T0 = .1210$ $M0 = .337 \times 10^{14}$ $MT = .337 \times 10^{14}$ $ERR = .131 \times 10^{13}$
 $DBCP. = 100.0\%$ $M = 3.0$
 $\delta A = 270.75$ $\delta A = 83.64$ $\delta B = 137.94$ $\delta B = 9.32$
P-axis: trend= 6.89 plunge= 38.27
T-axis: trend= 173.09 plunge= 50.91
B-axis: trend= 271.51 plunge= 6.78
Quality index = 66.1 reverse fault

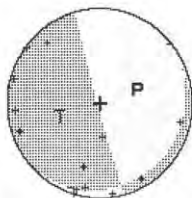
c) KWK Halemba 18-12-03 5:22 8,0E+06 J 17301 -313 -750



Full solution :
 -1.149×10^{15} -1.777×10^{14} -1.497×10^{15}
 -1.777×10^{14} 1.185×10^{15} -1.108×10^{16}
 -1.497×10^{15} -1.108×10^{16} -1.387×10^{15}
 $T0 = .0604$ $M0 = .123 \times 10^{16}$ $MT = .134 \times 10^{16}$ $ERR = .950 \times 10^{14}$
 $Expl. = -7.6\%$ $CLVD. = -5.1\%$ $DBCP. = 87.3\%$ $M = 4.1$
 $\delta A = 156.87$ $\delta A = 84.44$ $\delta B = 33.33$ $\delta B = 10.00$
P-axis: trend= 57.73 plunge= 49.90
T-axis: trend= 254.42 plunge= 38.89
B-axis: trend= 157.68 plunge= 8.28
Quality index = 51.9 normal fault

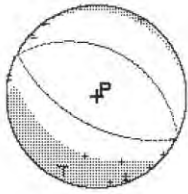


Trace null solution :
 -1.106×10^{15} -1.644×10^{14} -1.301×10^{15}
 -1.644×10^{14} 1.183×10^{15} -1.112×10^{16}
 -1.301×10^{15} -1.112×10^{16} -1.769×10^{14}
 $T0 = .0604$ $M0 = .114 \times 10^{16}$ $MT = .117 \times 10^{16}$ $ERR = .938 \times 10^{14}$
 $CLVD. = 4.7\%$ $DBCP. = 95.3\%$ $M = 4.0$
 $\delta A = 164.74$ $\delta A = 87.46$ $\delta B = 52.88$ $\delta B = 6.80$
P-axis: trend= 68.18 plunge= 47.18
T-axis: trend= 260.76 plunge= 42.12
B-axis: trend= 165.02 plunge= 6.30
Quality index = 57.4 normal fault

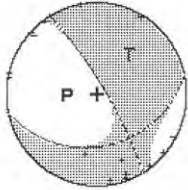


Double couple solution :
 -1.552×10^{14} -1.781×10^{14} -1.307×10^{15}
 -1.781×10^{14} 1.155×10^{15} -1.109×10^{16}
 -1.307×10^{15} -1.109×10^{16} -1.997×10^{14}
 $T0 = .0604$ $M0 = .114 \times 10^{16}$ $MT = .114 \times 10^{16}$ $ERR = .941 \times 10^{14}$
 $DBCP. = 100.0\%$ $M = 4.0$
 $\delta A = 164.52$ $\delta A = 87.48$ $\delta B = 52.13$ $\delta B = 6.59$
P-axis: trend= 68.18 plunge= 47.18
T-axis: trend= 260.33 plunge= 42.17
B-axis: trend= 164.78 plunge= 6.09
Quality index = 63.1 normal fault

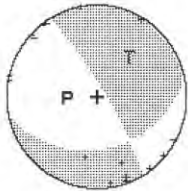
d) KWK Bielszowice 04-03-10 5:44 5,0E+07 J 17790 2240 -650



Full solution :
 $\begin{matrix} .582\text{E}+14 & .325\text{E}+14 & -.277\text{E}+15 \\ .325\text{E}+14 & -.842\text{E}+13 & -.192\text{E}+15 \\ -.277\text{E}+15 & -.192\text{E}+15 & -.175\text{E}+16 \end{matrix}$
 $T0 = .1430$ $M0 = .128\text{E}+16$ $MT = .179\text{E}+16$ $ERR = .519\text{E}+13$
 $Expl. = -19.5\%$ $CLVD = -18.8\%$ $DBCP = 61.7\%$ $M = 4.1$
 $\delta A = 118.33$ $\delta A = 55.07$ $\delta B = 295.27$ $\delta B = 34.96$
P-axis: trend= 35.38 plunge= 79.84
T-axis: trend= 207.07 plunge= 10.06
B-axis: trend= 297.33 plunge= 1.44
Quality index = 56.0 normal fault

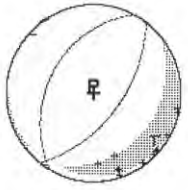


Trace null solution :
 $\begin{matrix} .435\text{E}+14 & .227\text{E}+14 & .224\text{E}+14 \\ .227\text{E}+14 & -.141\text{E}+14 & .639\text{E}+14 \\ .224\text{E}+14 & .639\text{E}+14 & -.294\text{E}+14 \end{matrix}$
 $T0 = .1430$ $M0 = .749\text{E}+14$ $MT = .811\text{E}+14$ $ERR = .592\text{E}+13$
 $CLVD = -10.4\%$ $DBCP = 89.6\%$ $M = 3.3$
 $\delta A = 328.44$ $\delta A = 78.64$ $\delta B = 78.59$ $\delta B = 30.25$
P-axis: trend= 268.81 plunge= 48.60
T-axis: trend= 36.16 plunge= 28.14
B-axis: trend= 142.41 plunge= 27.62
Quality index = 57.6 normal fault

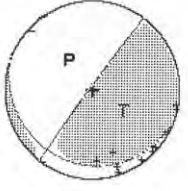


Double couple solution :
 $\begin{matrix} .379\text{E}+14 & .271\text{E}+14 & .259\text{E}+14 \\ .271\text{E}+14 & -.125\text{E}+14 & .555\text{E}+14 \\ .259\text{E}+14 & .555\text{E}+14 & -.255\text{E}+14 \end{matrix}$
 $T0 = .1430$ $M0 = .749\text{E}+14$ $MT = .749\text{E}+14$ $ERR = .575\text{E}+13$
 $DBCP = 100.0\%$ $M = 3.3$
 $\delta A = 328.44$ $\delta A = 78.64$ $\delta B = 78.59$ $\delta B = 30.25$
P-axis: trend= 268.81 plunge= 48.60
T-axis: trend= 36.16 plunge= 28.14
B-axis: trend= 142.41 plunge= 27.62
Quality index = 31.7 normal fault

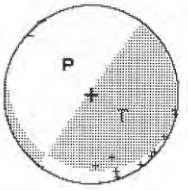
e) KWK Bielszowice 04-03-29 8:10 8,0E+07 J 17770 2310 -800



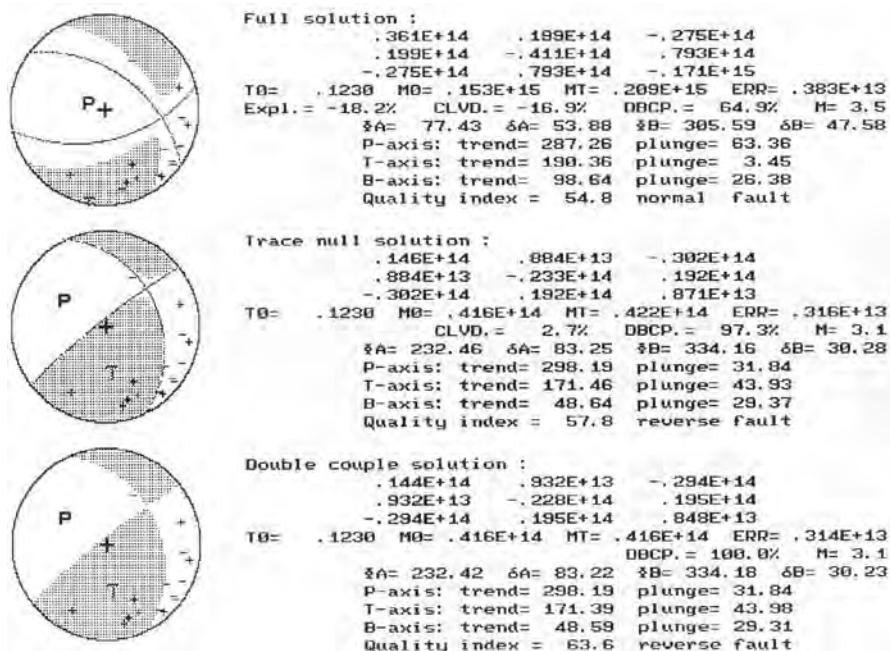
Full solution :
 $\begin{matrix} -.170\text{E}+13 & .319\text{E}+12 & -.161\text{E}+14 \\ .319\text{E}+12 & .670\text{E}+12 & .106\text{E}+14 \\ -.161\text{E}+14 & .106\text{E}+14 & -.107\text{E}+15 \end{matrix}$
 $T0 = .0754$ $M0 = .778\text{E}+14$ $MT = .110\text{E}+15$ $ERR = .856\text{E}+12$
 $Expl. = -19.8\%$ $CLVD = -19.7\%$ $DBCP = 60.5\%$ $M = 3.3$
 $\delta A = 37.38$ $\delta A = 54.35$ $\delta B = 209.15$ $\delta B = 35.93$
P-axis: trend= 327.28 plunge= 79.96
T-axis: trend= 123.93 plunge= 9.24
B-axis: trend= 214.57 plunge= 3.91
Quality index = 52.7 normal fault



Trace null solution :
 $\begin{matrix} -.136\text{E}+13 & .473\text{E}+12 & -.388\text{E}+13 \\ .473\text{E}+12 & .716\text{E}+12 & .534\text{E}+13 \\ -.388\text{E}+13 & .534\text{E}+13 & .642\text{E}+12 \end{matrix}$
 $T0 = .0754$ $M0 = .663\text{E}+13$ $MT = .672\text{E}+13$ $ERR = .906\text{E}+12$
 $CLVD = 2.5\%$ $DBCP = 97.5\%$ $M = 2.5$
 $\delta A = 216.79$ $\delta A = 87.55$ $\delta B = 112.73$ $\delta B = 10.00$
P-axis: trend= 315.98 plunge= 41.77
T-axis: trend= 116.81 plunge= 46.60
B-axis: trend= 217.21 plunge= 9.69
Quality index = 51.8 reverse fault



Double couple solution :
 $\begin{matrix} -.131\text{E}+13 & .606\text{E}+12 & -.382\text{E}+13 \\ .606\text{E}+12 & .766\text{E}+12 & .527\text{E}+13 \\ -.382\text{E}+13 & .527\text{E}+13 & .540\text{E}+12 \end{matrix}$
 $T0 = .0754$ $M0 = .663\text{E}+13$ $MT = .663\text{E}+13$ $ERR = .904\text{E}+12$
 $DBCP = 100.0\%$ $M = 2.5$
 $\delta A = 216.34$ $\delta A = 87.63$ $\delta B = 113.34$ $\delta B = 10.44$
P-axis: trend= 315.98 plunge= 41.77
T-axis: trend= 115.91 plunge= 46.44
B-axis: trend= 216.77 plunge= 10.16
Quality index = 57.6 reverse fault



Rys. 5.3a-f. Rozwiązanie mechanizmu ognisk dla przykładowych wstrząsów – obszar GZW. Parametry rozwiązania mechanizmu ognisk – opis danych: Kopalnia Data Czas Energia Współrzędne X, Y, Z; Full solution – rozwiązanie dla pełnego tensora; Trace null solution – rozwiązanie dla dipola sił; Double couple solution – rozwiązanie dla podwójnej pary sił; Składowe tensora momentu sejsmicznego M_{ij} (Nm); $-0,117E+15$; $0,125E+15$; $0,794E+14$; $0,125E+15$; $-0,674E+14$; $-0,428E+14$; $0,794E+14$; $-0,428E+14$; $0,763E+14$; T_0 – czas rozrywu, M_0 – skalarny moment sejsmiczny, M_T – całkowity moment sejsmiczny, ERR – błąd; procentowy udział poszczególnych składowych tensora; Expl. – (eksplozja (+), implozja (-)) CLVD – (jednoosiowe ściskanie (+) lub rozciąganie (-)) DBCP – składowa ścinająca; ϕA , B – azymut płaszczyzn nodalnych A i B, δA , B – upad płaszczyzn nodalnych A i B, P, T, B axis trend – azymut osi P, T, B plunge – zanurzenie osi P, T, B; Q – współczynnik jakości rozwiązania, typ mechanizmu (normal fault – normalny, reverse fault – odwrócony)

Tablica 5.1. Parametry mechanizmu ognisk dla analizowanych wstrząsów – obszar GZW

Data	Energia	X, m	Y, m	Expl.	CLVD	DBCP	Typ	Kierunek pł. nodalnej	Położenie
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2003-07-02	6,0E+06	17600	2000	-20	-20	60	NO	NE-SW	równoległy do uskoku
2003-07-03	2,0E+06	17640	2240	-17	-16	67	NO	NW-SE	zblizony do uskoku
2003-07-24	8,0E+07	17560	2060	-20	-19	61	NO	N-S	równoległy do uskoku
2003-07-29	9,0E+06	17670	2160	19	-8	73	RE	NW-SE	zblizony do uskoku
2003-08-08	2,0E+06	16740	-920	-19	-17	64	NO		inny
2003-08-09	9,0E+05	17550	2260	-20	-19	61	NO	NE-SW	równoległy do uskoku
2003-08-12	6,0E+07	18611	-1322	-19	-19	63	NO	NW-SE	równoległy do uskoku
2003-08-12	2,0E+06	17570	2040	-20	-19	61	NO	E-W	równoległy do uskoku
2003-08-21	8,0E+06	17640	2140	-17	-18	65	NO	E-W	równoległy do uskoku
2003-08-23	8,0E+06	19500	-4320	-18	-18	64	NO	NE-SW	równoległy do uskoku

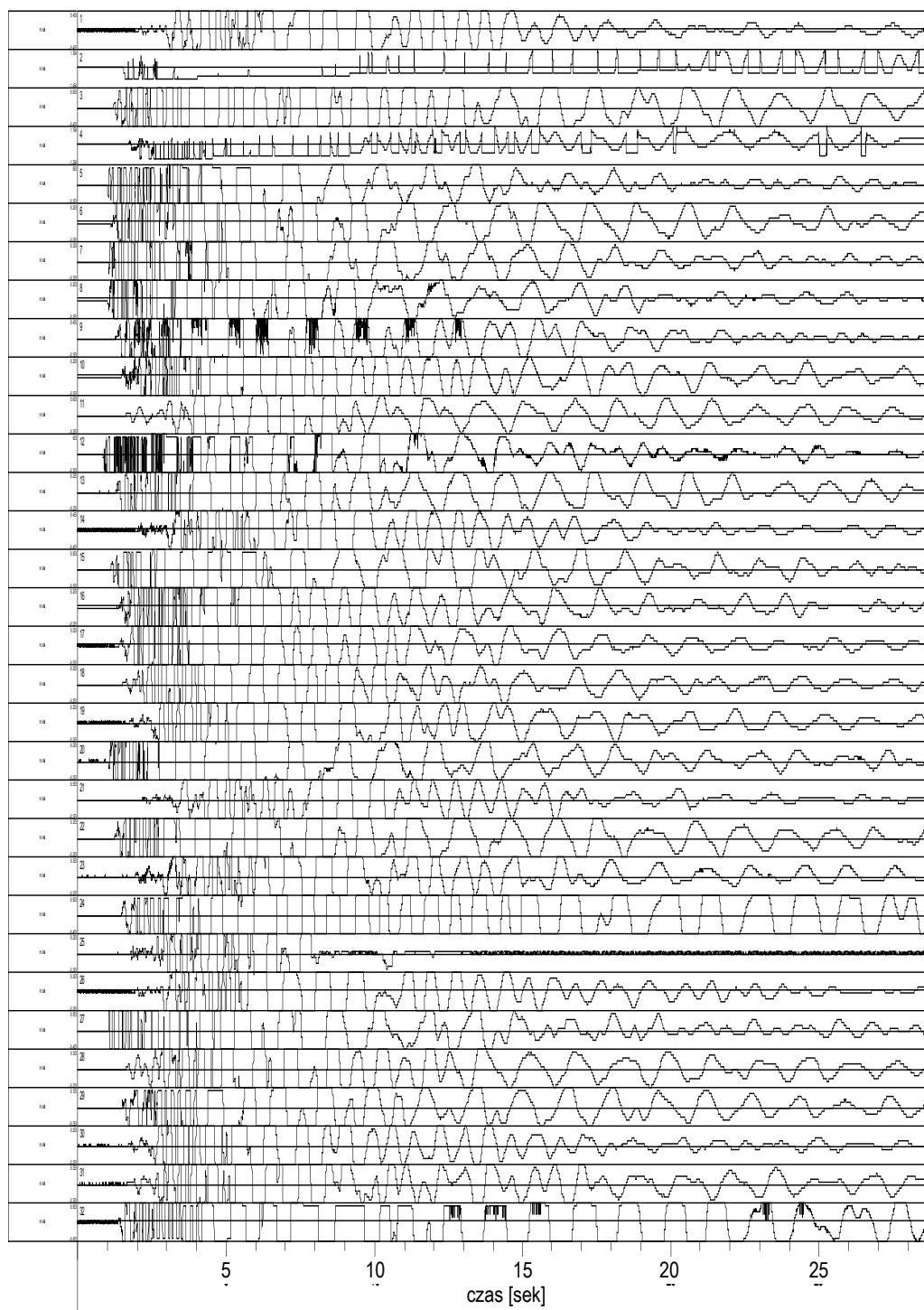
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2003-08-25	3,0E+07	17580	2250	-19	-19	60	NO	NE-SW	równoległy do uskoku
2003-08-28	9,0E+06	18430	-2750	-18	-17	65	NO	NE-SW	równoległy do uskoku
2003-09-05	7,0E+06	17640	2260	-19	-19	62	NO	E-W	równoległy do uskoku
2003-09-10	8,0E+06	17630	2100	-18	-13	70	NO	NE-SW	równoległy do uskoku
2003-09-14	3,0E+06	17311	-459	-17	-20	63	NO	NE-SW	równoległy do uskoku
2003-09-18	2,0E+07	17590	2160	-7	-8	84	NO	S-N	równoległy do uskoku
2003-09-25	1,0E+07	17600	2210	-13	-12	74	NO	E-W	równoległy do uskoku
2003-10-08	2,0E+07	17650	2000	-19	-20	60	NO	S-N	równoległy do uskoku
2003-10-08	9,0E+06	15170	4340	46	47	7	RE		inny
2003-10-15	9,0E+06	17680	2230	-15	-12	73	NO	E-W	równoległy do uskoku
2003-10-16	1,0E+07	18315	-305	-19	-18	63	NO	NW-SE	równoległy do uskoku
2003-10-17	5,0E+06	17850	2060	-21	-18	60	NO	N-S	równoległy do uskoku
2003-10-24	6,0E+06	17291	-442	49	48	2	RE		inny
2003-10-25	1,0E+07	17382	-411	-16	-16	67	NO	NW-SE	równoległy do uskoku
2003-10-29	9,0E+06	18137	-432	-19	-20	61	NO	NE-SW	równoległy do uskoku
2003-10-30	9,0E+06	19500	-2940	-12	-7	80	NO	E-W	równoległy do uskoku
2003-11-04	4,0E+06	17333	-335	-15	-2	83	NO	NW-SE	równoległy do uskoku
2003-11-07	1,0E+06	17700	1970	-6	-7	87	RE	NW-SE	równoległy do uskoku
2003-11-08	8,0E+07	17670	2230	-17	-17	66	NO	E-W	równoległy do uskoku
2003-11-17	1,0E+06	18260	-315	-19	-19	62	NO	NE-SW	równoległy do uskoku
2003-11-25	9,0E+06	17287	-386	7	38	55	RE	NW-SE	rów. do krawędzi lub frontu
2003-12-01	2,0E+06	19401	-1012	-18	-17	74	NO	E-W	równoległy do uskoku
2003-12-04	9,0E+06	17810	2260	-20	-20	60	NO	E-W	rów. do krawędzi lub frontu
2003-12-09	2,0E+07	17690	2080	-17	-17	64	NO	NE-SW	równoległy do uskoku
2003-12-16	3,0E+06	17281	-401	-19	-19	62	NO	E-W	rów. do krawędzi lub frontu
2003-12-18	8,0E+06	17301	-313	43	46	10	RE	NW-SE	inny
2004-01-10	4,0E+07	17282	-261	-16	-18	66	NO	E-W	rów. do krawędzi lub frontu
2004-01-15	7,0E+06	17312	-228	-16	-18	66	NO	NW-SE	równoległy do uskoku
2004-01-20	5,0E+06	16230	1800	41	41	17	RE		inny
2004-01-22	9,0E+07	17655	-122	-8	-5	87	NO	NE-SW	równoległy do uskoku
2004-01-27	2,0E+06	18221	-319	-16	-12	72	NO	NW-SE	inny
2004-01-30	7,0E+06	17780	2150	-21	18	60	NO	N-S	równoległy do uskoku
2004-02-06	2,0E+06	16000	1710	39	35	25	RE		inny
2004-02-06	6,0E+05	16010	1840	29	28	43	RE		inny
2004-02-19	8,0E+06	17850	2090	28	13	60	RE	NW-SE	równoległy do uskoku
2004-03-02	7,0E+05	17291	-30	-19	-19	62	NO	NE-SW	równoległy do uskoku
2004-03-10	5,0E+07	17790	2240	-19	-18	61	NO	NW-SE	prostopadły do uskoku
2004-03-13	9,0E+06	17342	-138	-13	7	80	NO	N-S	równoległy do uskoku
2004-03-20	9,0E+06	17850	2290	-20	-19	61	NO	E-W	równoległy do uskoku
2004-03-24	8,0E+06	17183	88	-10	-12	78	SS	NE-SW	równoległy do uskoku
2004-03-29	8,0E+07	17770	2310	-20	-20	60	NO	NE-SW	równoległy do uskoku
2004-04-09	2,0E+06	17296	-156	-18	-17	64	NO	E-W	rów. do krawędzi lub frontu
2004-04-16	9,0E+05	17256	-171	48	47	5	RE		inny
2004-04-23	1,0E+06	15430	3810	-17	-18	-64	NO	NE-SW	inny
2004-04-29	8,0E+05	17315	157	37	37	27	RE	NE-SW	równoległy do uskoku
2004-05-11	5,0E+06	17524	36	46	42	11	RE		inny
2004-05-19	4,0E+06	17482	88	44	38	18	RE		inny
2004-05-22	5,0E+06	17750	-50	43	39	17	RE		inny
2004-05-31	1,0E+06	17502	-51	49	48	3	RE		inny
2004-07-19	2,0E+07	19425	-960	-16	-18	66	NO	E-W	równoległy do uskoku
2004-08-27	8,0E+05	17280	-240	45	43	11	RE		inny
2004-09-09	3,0E+07	17447	-1051	-14	-15	70	NO	NE-SW	równoległy do uskoku
2004-10-09	1,0E+06	16390	1700	-13	-7	80	NO	E-W	rów. do krawędzi lub frontu
2004-11-26	2,0E+06	17000	4000	-18	-18	63	NO	E-W	równoległy do uskoku

5.3. Wyniki analizy mechanizmu ognisk wstrząsów w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym

Dla wszystkich wstrząsów, które zostały zarejestrowane przez powierzchniowe stanowiska pomiarowe w LGOM, utworzono bazę cyfrowych sejsmogramów wstrząsów, obejmującą rejestracje z 32-kanalowej kopalnianej sieci seismologicznej ZG „Rudna”. Baza ta była podstawą do określania mechanizmu ognisk wstrząsów. Przykład sejsmogramu jednego z najsilniejszych wstrząsów przedstawiono na rysunku 5.4. Określenie mechanizmu ognisk wstrząsów wykonano, opisaną wcześniej, metodą inwersji tensora momentu sejsmicznego z wykorzystaniem fali podłużnej typu P. Do obliczeń zastosowano program SMT-94.

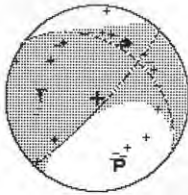
Na rysunkach 5.5a–f przedstawiono pełne rozwiązanie mechanizmu ognisk dla przykładowych wstrząsów, a procentowy udział poszczególnych składowych dla pełnego tensora momentu sejsmicznego oraz korelację rozciągłości płaszczyzn nodalnych z warunkami geologiczno-górnictwymi w rejonie występowania ognisk wstrząsów – w tablicy 5.2.

Analiza mechanizmu ognisk wykazała, że wstrząsy, które wystąpiły w ZG „Rudna” w znacznej części charakteryzowały się mechanizmem poślizgowym. Mechanizm ognisk w przypadku pełnego rozwiązania tensora momentu sejsmicznego zawierał od około 20% składowej implozyjnej i tyle samo składowej jednoosiowego ściskania. Składowa ścinająca wynosiła od 60 do 80%. W większości wstrząsów płaszczyzny pęknięcia w ognisku miały przebieg, który można było skorelować z przebiegiem strefy uskokowej Rudnej Głównej lub strefy uskokowej Biedzychowa. Tak jak dla poligonu w GZW badania prowadzono w celu powiązania uzyskanych parametrów mechanizmu ognisk z rozkładem przyspieszeń drgań na powierzchni, co wykazano w rozdziale 6.

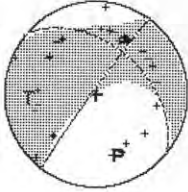


Rys. 5.4. Sejsmogram wstrząsu o energii sejsmicznej $1,5 \cdot 10^9$ J z dnia 20.02.2002 r., godz. 12:27

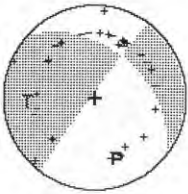
a) 17-09-2002 14:06 2,8E+08 J 33062 8261 -800



Full solution :
 $\begin{matrix} -.561\text{E}+12 & .233\text{E}+12 & .490\text{E}+12 \\ .233\text{E}+12 & .548\text{E}+12 & -.337\text{E}+12 \\ .490\text{E}+12 & -.337\text{E}+12 & .305\text{E}+12 \end{matrix}$
 $T0 = .0375 \quad M0 = .501\text{E}+12 \quad MT = .873\text{E}+12 \quad ERR = .274\text{E}+12$
 $Expl. = 6.1\% \quad CLVD = -16.9\% \quad DBCP = 77.1\% \quad M = 1.8$
 $\delta A = 43.35 \quad \delta A = 82.07 \quad \delta B = 304.30 \quad \delta B = 41.50$
P-axis: trend= 164.22 plunge= 25.60
T-axis: trend= 276.91 plunge= 38.84
B-axis: trend= 50.16 plunge= 40.39
Quality index = 35.1 strike slip

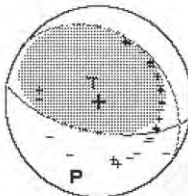


Trace null solution :
 $\begin{matrix} -.548\text{E}+12 & .229\text{E}+12 & .497\text{E}+12 \\ .229\text{E}+12 & .540\text{E}+12 & -.364\text{E}+12 \\ .497\text{E}+12 & -.364\text{E}+12 & .830\text{E}+10 \end{matrix}$
 $T0 = .0375 \quad M0 = .725\text{E}+12 \quad MT = .854\text{E}+12 \quad ERR = .273\text{E}+12$
 $CLVD = -15.7\% \quad DBCP = 84.3\% \quad M = 1.9$
 $\delta A = 216.22 \quad \delta A = 87.60 \quad \delta B = 308.57 \quad \delta B = 45.67$
P-axis: trend= 162.61 plunge= 31.58
T-axis: trend= 271.42 plunge= 27.68
B-axis: trend= 33.77 plunge= 45.57
Quality index = 50.3 strike slip

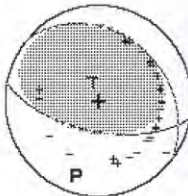


Double couple solution :
 $\begin{matrix} -.479\text{E}+12 & .136\text{E}+12 & .316\text{E}+12 \\ .136\text{E}+12 & .521\text{E}+12 & -.395\text{E}+12 \\ .316\text{E}+12 & -.395\text{E}+12 & -.425\text{E}+11 \end{matrix}$
 $T0 = .0375 \quad M0 = .725\text{E}+12 \quad MT = .725\text{E}+12 \quad ERR = .272\text{E}+12$
 $DBCP = 100.0\% \quad M = 1.9$
 $\delta A = 216.22 \quad \delta A = 87.60 \quad \delta B = 308.57 \quad \delta B = 45.67$
P-axis: trend= 162.61 plunge= 31.58
T-axis: trend= 271.42 plunge= 27.68
B-axis: trend= 33.77 plunge= 45.57
Quality index = 26.2 strike slip

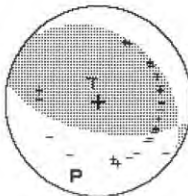
b) 24-01-2003 19:31 5:11 4,7E+08 J 28300 5800 -800



Full solution :
 $\begin{matrix} -.556\text{E}+13 & -.219\text{E}+13 & .534\text{E}+13 \\ -.219\text{E}+13 & -.204\text{E}+13 & -.208\text{E}+12 \\ .534\text{E}+13 & -.208\text{E}+12 & .737\text{E}+13 \end{matrix}$
 $T0 = .0520 \quad M0 = .791\text{E}+13 \quad MT = .883\text{E}+13 \quad ERR = .751\text{E}+12$
 $Expl. = -.9\% \quad CLVD = 17.0\% \quad DBCP = 82.0\% \quad M = 2.6$
 $\delta A = 100.44 \quad \delta A = 63.59 \quad \delta B = 305.65 \quad \delta B = 28.76$
P-axis: trend= 199.19 plunge= 17.78
T-axis: trend= 346.44 plunge= 69.13
B-axis: trend= 105.76 plunge= 10.58
Quality index = 70.7 reverse fault

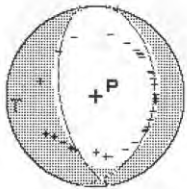


Trace null solution :
 $\begin{matrix} -.547\text{E}+13 & -.225\text{E}+13 & .543\text{E}+13 \\ -.225\text{E}+13 & -.215\text{E}+13 & -.208\text{E}+12 \\ .543\text{E}+13 & -.208\text{E}+12 & .763\text{E}+13 \end{matrix}$
 $T0 = .0520 \quad M0 = .814\text{E}+13 \quad MT = .900\text{E}+13 \quad ERR = .752\text{E}+12$
 $CLVD = 18.8\% \quad DBCP = 81.2\% \quad M = 2.6$
 $\delta A = 101.08 \quad \delta A = 63.56 \quad \delta B = 306.72 \quad \delta B = 28.88$
P-axis: trend= 200.01 plunge= 17.71
T-axis: trend= 346.64 plunge= 69.07
B-axis: trend= 106.52 plunge= 10.79
Quality index = 73.7 reverse fault

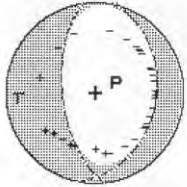


Double couple solution :
 $\begin{matrix} -.554\text{E}+13 & -.259\text{E}+13 & .485\text{E}+13 \\ -.259\text{E}+13 & -.814\text{E}+12 & .211\text{E}+12 \\ .485\text{E}+13 & .211\text{E}+12 & .636\text{E}+13 \end{matrix}$
 $T0 = .0520 \quad M0 = .814\text{E}+13 \quad MT = .814\text{E}+13 \quad ERR = .772\text{E}+12$
 $DBCP = 100.0\% \quad M = 2.6$
 $\delta A = 101.28 \quad \delta A = 63.52 \quad \delta B = 306.38 \quad \delta B = 28.82$
P-axis: trend= 200.01 plunge= 17.71
T-axis: trend= 347.24 plunge= 69.20
B-axis: trend= 106.60 plunge= 10.55
Quality index = 76.4 reverse fault

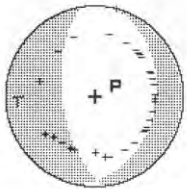
c) 16-05-2004 11:53 8,4E+08 J 31462 5033 -722



Full solution :
 $\begin{matrix} .365E+13 & -.141E+13 & -.431E+14 \\ -.141E+13 & .158E+15 & -.869E+14 \\ -.431E+14 & -.869E+14 & -.231E+15 \end{matrix}$
 $T0 = .0598 \quad M0 = .220E+15 \quad MT = .246E+15 \quad ERR = .919E+13$
 $Expl. = -7.1\% \quad CLVD = -10.3\% \quad DBCP = 82.5\% \quad M = 3.6$
 $\delta A = 170.08 \quad \delta A = 57.83 \quad \delta B = 8.55 \quad \delta B = 33.55$
P-axis: trend= 51.56 plunge= 74.97
T-axis: trend= 267.36 plunge= 12.28
B-axis: trend= 175.49 plunge= 8.52
Quality index = 74.9 normal fault

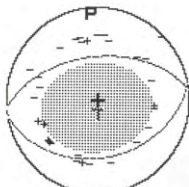


Trace null solution :
 $\begin{matrix} .562E+13 & -.738E+13 & -.252E+14 \\ -.738E+13 & .144E+15 & -.849E+14 \\ -.252E+14 & -.849E+14 & -.150E+15 \end{matrix}$
 $T0 = .0598 \quad M0 = .167E+15 \quad MT = .172E+15 \quad ERR = .949E+13$
 $CLVD = -4.8\% \quad DBCP = 95.2\% \quad M = 3.5$
 $\delta A = 173.50 \quad \delta A = 60.47 \quad \delta B = 11.68 \quad \delta B = 30.80$
P-axis: trend= 60.90 plunge= 72.91
T-axis: trend= 270.22 plunge= 15.00
B-axis: trend= 178.06 plunge= 7.99
Quality index = 76.6 normal fault

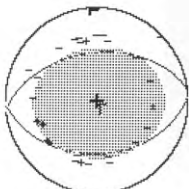


Double couple solution :
 $\begin{matrix} -.352E+13 & -.524E+13 & -.235E+14 \\ -.524E+13 & .145E+15 & -.825E+14 \\ -.235E+14 & -.825E+14 & -.141E+15 \end{matrix}$
 $T0 = .0598 \quad M0 = .167E+15 \quad MT = .167E+15 \quad ERR = .959E+13$
 $DBCP = 100.0\% \quad M = 3.5$
 $\delta A = 172.93 \quad \delta A = 60.48 \quad \delta B = 11.11 \quad \delta B = 30.80$
P-axis: trend= 60.34 plunge= 72.91
T-axis: trend= 269.65 plunge= 15.01
B-axis: trend= 177.49 plunge= 7.99
Quality index = 79.5 normal fault

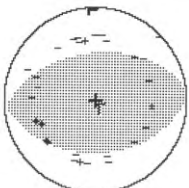
d) 02-09-2004 7:24 1,8E+09 J 31958 9150 -600



Full solution :
 $\begin{matrix} -.599E+15 & .475E+14 & -.135E+15 \\ .475E+14 & -.281E+15 & .355E+12 \\ -.135E+15 & .355E+12 & .412E+15 \end{matrix}$
 $T0 = .0818 \quad M0 = .349E+15 \quad MT = .569E+15 \quad ERR = .539E+14$
 $Expl. = -25.0\% \quad CLVD = 19.0\% \quad DBCP = 56.0\% \quad M = 3.7$
 $\delta A = 263.43 \quad \delta A = 52.39 \quad \delta B = 80.36 \quad \delta B = 37.65$
P-axis: trend= 352.09 plunge= 7.38
T-axis: trend= 183.61 plunge= 82.47
B-axis: trend= 82.29 plunge= 1.49
Quality index = 65.5 reverse fault

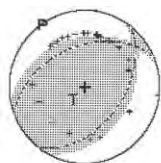


Trace null solution :
 $\begin{matrix} -.686E+15 & .297E+14 & -.914E+14 \\ .297E+14 & -.277E+15 & .711E+14 \\ -.914E+14 & .711E+14 & .963E+15 \end{matrix}$
 $T0 = .0818 \quad M0 = .693E+15 \quad MT = .867E+15 \quad ERR = .582E+14$
 $CLVD = 40.1\% \quad DBCP = 59.9\% \quad M = 3.9$
 $\delta A = 262.59 \quad \delta A = 48.42 \quad \delta B = 88.45 \quad \delta B = 41.73$
P-axis: trend= 355.35 plunge= 3.35
T-axis: trend= 134.20 plunge= 85.56
B-axis: trend= 265.18 plunge= 2.91
Quality index = 73.9 reverse fault

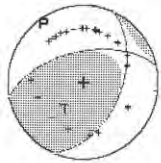


Double couple solution :
 $\begin{matrix} -.685E+15 & .536E+14 & -.774E+14 \\ .536E+14 & -.212E+13 & .442E+14 \\ -.774E+14 & .442E+14 & .687E+15 \end{matrix}$
 $T0 = .0818 \quad M0 = .693E+15 \quad MT = .693E+15 \quad ERR = .619E+14$
 $DBCP = 100.0\% \quad M = 3.9$
 $\delta A = 262.39 \quad \delta A = 48.43 \quad \delta B = 88.68 \quad \delta B = 41.74$
P-axis: trend= 355.35 plunge= 3.35
T-axis: trend= 132.20 plunge= 85.42
B-axis: trend= 265.17 plunge= 3.13
Quality index = 76.4 reverse fault

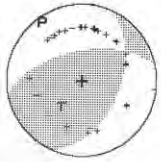
e) 09-09-2004 22:52 1,5E+08 J 29462 7464 -800



Full solution :
 $\begin{matrix} -.189E+15 & .189E+15 & -.116E+15 \\ .189E+15 & -.896E+14 & -.150E+15 \\ -.116E+15 & -.150E+15 & .690E+15 \end{matrix}$
 $T_0 = .0827 \quad M_0 = .575E+15 \quad M_T = .739E+15 \quad ERR = .464E+14$
 Expl. = 22.6% CLVD = 22.0% DBCP = 55.4% M = 3.8
 $\phi A = 247.19 \quad \delta A = 47.03 \quad \phi B = 37.40 \quad \delta B = 47.02$
 P-axis: trend= 322.29 plunge= .00
 T-axis: trend= 232.27 plunge= 74.57
 B-axis: trend= 52.30 plunge= 15.43
 Quality index = 71.8 reverse fault

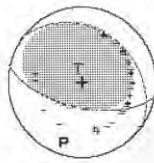


Trace null solution :
 $\begin{matrix} -.169E+15 & .204E+15 & -.163E+15 \\ .204E+15 & -.970E+14 & -.102E+15 \\ -.163E+15 & -.102E+15 & .266E+15 \end{matrix}$
 $T_0 = .0827 \quad M_0 = .346E+15 \quad M_T = .364E+15 \quad ERR = .483E+14$
 CLVD = 9.8% DBCP = 90.2% M = 3.7
 $\phi A = 257.79 \quad \delta A = 58.19 \quad \phi B = 23.30 \quad \delta B = 46.89$
 P-axis: trend= 322.78 plunge= 6.35
 T-axis: trend= 222.16 plunge= 58.88
 B-axis: trend= 56.52 plunge= 30.32
 Quality index = 69.9 reverse fault

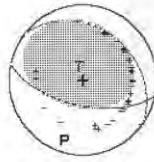


Double couple solution :
 $\begin{matrix} -.165E+15 & .212E+15 & -.144E+15 \\ .212E+15 & -.821E+14 & -.810E+14 \\ -.144E+15 & -.810E+14 & .247E+15 \end{matrix}$
 $T_0 = .0827 \quad M_0 = .346E+15 \quad M_T = .346E+15 \quad ERR = .479E+14$
 DBCP = 100.0% M = 3.7
 $\phi A = 258.09 \quad \delta A = 58.38 \quad \phi B = 22.99 \quad \delta B = 47.10$
 P-axis: trend= 322.78 plunge= 6.35
 T-axis: trend= 222.35 plunge= 58.44
 B-axis: trend= 56.58 plunge= 30.77
 Quality index = 72.7 reverse fault

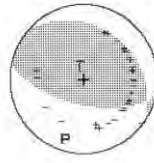
f) 19-12-2004 0:54 2,5E+07 J 29763 7099 -800



Full solution :
 $\begin{matrix} -.611E+13 & -.221E+13 & .547E+13 \\ -.221E+13 & -.275E+13 & -.162E+12 \\ .547E+13 & -.162E+12 & .879E+13 \end{matrix}$
 $T_0 = .0520 \quad M_0 = .055E+13 \quad M_T = .980E+13 \quad ERR = .749E+12$
 Expl. = -.3% CLVD = 23.9% DBCP = 75.8% M = 2.6
 $\phi A = 102.38 \quad \delta A = 61.90 \quad \phi B = 304.08 \quad \delta B = 29.88$
 P-axis: trend= 200.18 plunge= 16.26
 T-axis: trend= 348.65 plunge= 71.11
 B-axis: trend= 107.42 plunge= 9.35
 Quality index = 71.3 reverse fault



Trace null solution :
 $\begin{matrix} -.609E+13 & -.223E+13 & .551E+13 \\ -.223E+13 & -.280E+13 & -.162E+12 \\ .551E+13 & -.162E+12 & .889E+13 \end{matrix}$
 $T_0 = .0520 \quad M_0 = .063E+13 \quad M_T = .986E+13 \quad ERR = .749E+12$
 CLVD = 24.5% DBCP = 75.5% M = 2.6
 $\phi A = 102.60 \quad \delta A = 61.89 \quad \phi B = 304.45 \quad \delta B = 29.92$
 P-axis: trend= 200.46 plunge= 16.24
 T-axis: trend= 348.69 plunge= 71.09
 B-axis: trend= 107.69 plunge= 9.43
 Quality index = 74.2 reverse fault



Double couple solution :
 $\begin{matrix} -.612E+13 & -.276E+13 & .475E+13 \\ -.276E+13 & -.943E+12 & .335E+12 \\ .475E+13 & .335E+12 & .706E+13 \end{matrix}$
 $T_0 = .0520 \quad M_0 = .063E+13 \quad M_T = .063E+13 \quad ERR = .776E+12$
 DBCP = 100.0% M = 2.6
 $\phi A = 102.85 \quad \delta A = 61.85 \quad \phi B = 304.02 \quad \delta B = 29.85$
 P-axis: trend= 200.46 plunge= 16.24
 T-axis: trend= 349.57 plunge= 71.25
 B-axis: trend= 107.78 plunge= 9.11
 Quality index = 76.8 reverse fault

Rys. 5.5a-f. Rozwiązanie mechanizmu ognisk dla przykładowych wstrząsów z LGOM. Parametry rozwiązania mechanizmu ognisk – opis danych: Data Czas Energia Współrzędne X, Y, Z; Full solution – rozwiązanie dla pełnego tensora; Trace null solution – rozwiązanie dla dipola sił; Double couple solution – rozwiązanie dla podwójnej pary sił; Składowe tensora momentu sejsmicznego M_{ij} (Nm); $-0,117E+15$; $0,125E+15$; $0,794E+14$; $0,125E+15$; $-0,674E+14$; $-0,428E+14$; $0,794E+14$; $-0,428E+14$; $0,763E+14$; T_0 – czas rozrywu, M_0 – skalarny moment sejsmiczny, M_T – całkowity moment sejsmiczny, ERR – błąd; procentowy udział poszczególnych składowych tensora; Expl. – (eksplozja (+), implozja (-) CLVD – (jednoosiowe ściskanie (+) lub rozciąganie (-) DBCP – składowa ścinająca; ϕA , B – azymut płaszczyzn nodalnych A i B, δA , B – upad płaszczyzn nodalnych A i B, P, T, B axis trend – azymut osi P, T, B plunge – zanurzenie osi P, T, B; Q – współczynnik jakości rozwiązania, typ mechanizmu (normal fault – normalny, reverse fault – odwrócony)

Tablica 5.2. Parametry mechanizmu ognisk dla analizowanych wstrząsów – obszar LGOM

Data	Energia	X, m	Y, m	Expl.	CLVD	DBCP	Typ	Kierunek pl. nodalnej	Strefa uskokowa
01-02-13	7,1E+07	29750	6201	-15	-12	73	NO	NW-SE	strefa uskokowa Biedzychowa
01-10-19	1,7E+08	31800	5474	-7	-16	77	NO	W-E	strefa uskokowa Rudnej Głównej
01-10-30	1,4E+08	33287	8334	25	29	45	RE	NW-SE	inny
02-02-16	4,5E+08	32794	8464	-5	-20	75	NO	SW-NE	inny
02-02-20	1,5E+09	30131	6168	-1	24	75	NO	E-W	strefa uskokowa Rudnej Głównej
02-04-28	1,9E+08	29053	6446	-41	2	56	NO	W-E	strefa uskokowa Rudnej Głównej
02-07-02	1,9E+08	30800	6392	-18	-7	75	SS	NW-SE	strefa uskokowa Biedzychowa
02-08-26	3,1E+07	32507	4501	-12	-15	73	NO	SW-NE	inny
02-09-17	2,0E+08	33062	8261	6	-17	77	SS		inny
02-09-30	1,1E+07	30686	6248	-1	15	84	RE	E-W	strefa uskokowa Rudnej Głównej
02-10-10	2,8E+08	29473	7494	5	17	79	NO	N-S	strefa uskokowa Biedzychowa
02-11-25	5,4E+07	30835	6421	-1	17	82	RE	E-W	strefa uskokowa Rudnej Głównej
03-01-24	4,7E+08	28300	5800	-3	-21	76	NO	S-N	strefa uskokowa Biedzychowa
03-02-11	1,2E+07	30691	6338	-10	-10	80	NO	W-E	strefa uskokowa Rudnej Głównej
03-03-28	1,7E+08	30652	6326	-4	-1	95	NO	SW-NE	strefa uskokowa Rudnej Głównej
03-05-31	3,6E+08	34212	6582	-8	-19	73	NO	SW-NE	inny
03-07-25	1,8E+07	31701	6353	-39	21	39	RE		inny
03-10-05	3,0E+08	31900	9500	-10	-18	72	RE	SW-NE	inny
04-01-25	1,3E+08	28291	7266	-11	-19	69	NO	S-N	strefa uskokowa Biedzychowa
04-01-27	1,2E+08	32598	5100	27	31	42	RE	NW-SE	inny
04-02-15	1,9E+8	28650	7700	18	-7	75	SS	NW-SE	strefa uskokowa Biedzychowa
04-04-17	1,0E+07	24964	6429	-46	5	49	RE	W-E	równoległy do strefy L
04-05-09	2,9E+07	30571	6463	-2	-16	82	NO	SW-NE	strefa uskokowa Rudnej Głównej
04-05-16	8,4E+08	31462	5033	-5	73	21	RE	E-W	strefa uskokowa Rudnej Głównej
04-06-07	1,2E+07	30774	6634	-8	5	87	RE	E-W	strefa uskokowa Rudnej Głównej
04-06-16	2,1E+07	30832	6674	-14	-21	65	RE	N-S	inny
04-06-20	1,4E+08	28600	7300	-10	-14	76	NO	NW-SE	inny
04-08-25	1,3E+08	27449	8778	-7	-10	83	NO	N-S	strefa uskokowa Biedzychowa
04-08-29	7,5E+07	28800	7100	-14	-7	78	NO	E-W	strefa uskokowa Biedzychowa
04-09-02	1,8E+09	31958	9150	-25	-9	65	NO	SW-NE	inny
04-09-09	1,5E+08	29462	7464	23	22	55	RE	SW-NE	inny
04-09-11	2,3E+07	36637	7306	-12	-2	68	NO	NE-SW	inny
04-09-26	2,3E+07	33146	8152	-1	23	77	RE	NW-SE	inny
04-10-09	3,0E+08	30400	10350	4	-13	83	NO	W-E	inny
04-11-06	1,2E+08	30907	6766	-25	19	56	RE	W-E	strefa uskokowa Rudnej Głównej
04-11-18	3,9E+07	33302	8139	-4	-21	74	NO	N-S	inny
04-11-27	3,0E+07	30550	6700	-13	-6	81	NO	W_E	strefa uskokowa Rudnej Głównej
04-12-16	1,3E+07	35047	9489	-13	-14	-73	NO	NW-SE	inny
04-12-19	2,5E+07	29763	7099	-2	-6	92	RE	W-E	strefa uskokowa Rudnej Głównej

6. Analiza kierunkowości radiacji fal sejsmicznych

6.1. Zarys metody

Na podstawie analizy zarejestrowanych drgań powierzchni ziemi, które są powodowane wstrząsami górnictwymi, można stwierdzić, że nie tylko w strefie epicentralnej, ale także w dalekim polu falowym, występują pewne anomalie rejestrowanych parametrów charakteryzujących intensywność tych drgań. Dotyczy to zarówno obszaru GZW, jak i LGOM. Jak już wspomniano, jedną z tego typu anomalii jest, na przykład występowanie na stanowiskach zlokalizowanych w bardzo zbliżonych odległościach od epicentrum wstrząsu, ale o różnym azymucie względem epicentrum, dużej rozbieżności rejestrowanych amplitud przyspieszenia. Część tych różnic może mieć związek z lokalną geologiczną amplifikacją drgań, jak również amplifikacją topograficzną. Jednak wielu rejestracji przyspieszeń drgań nie można wytłumaczyć istnieniem jedynie zjawiska amplifikacji drgań przez nadkład. Dokładniejsza analiza tych rejestracji z równoczesną korelacją z mechanizmami ognisk wstrząsów, tektoniką obszaru epicentralnego i innymi czynnikami wskazuje, że przyczyną różnic w rejestrowanych amplitudach drgań może być wyraźna kierunkowość radiacji fal, a więc ich kierunkowe wypromieniowanie z ogniska wstrząsu. Wniosek taki – w sensie jakościowym – można wysnuć na podstawie analizy kierunków radiacji amplitud przemieszczenia cząstek ośrodka skalnego, która jest przedstawiona w układzie przestrzennym.

Rozpatrując problem sejsmicznych oddziaływań na powierzchnię, szczególnie w aspekcie oszacowania obciążeń dynamicznych w odległościach bliskich od ogniska wstrząsu, poznanie charakteru i pewnych osobliwości zjawiska propagacji fal sejsmicznych, charakterystycznych dla różnych modeli ognisk wstrząsów, jest ważnym problemem. Można stwierdzić, że już tylko porównanie propagacji pola falowego i jego charakterystycznych cech w bliskim i dalekim polu falowym pozwala na zrozumienie ogromnej różnicy w dynamice drgań występujących w różnych fragmentach górotworu oraz na powierzchni.

W zasadzie wiedza o procesach zachodzących w strefie ognisk wstrząsów górniczych, zresztą podobnie jak i trzęsień Ziemi, bazuje, prawie wyłącznie, na rejestracji, interpretacji i analizie pola fal sejsmicznych, które w swojej strukturze zawiera także informacje o ognisku i procesach, które go formowały. Rejestruje się zazwyczaj pole prędkości drgań lub pole przemieszczeń, w różnych kierunkach i w różnych odległościach od ogniska. Charakterystyka tych pól dla wybranych modeli ogniska pozwala na opisywanie procesów wstrząsów górotworu za pomocą określonych parametrów fizycznych. Jak wspomniano, reprezentantem ogniska wstrząsu może być odpowiednia superpozycja pojedynczych sił lub par sił.

Wektor przemieszczenia $u_n(x, t)$ wywołany przez źródło sejsmiczne może być wyrażony przez tensor momentu M_{pq} i funkcję Greene'a G_{np} . Jawną postać funkcji Greene'a, dla nieskończonego jednorodnego ośrodka jako przemieszczenie $u(x, t)$, powodowane przez pojedynczą siłę F przyłożoną w punkcie $\zeta = 0$ i w czasie $\tau = 0$ oraz działającą w kierunku x_m , podał Stokes

$$u_n(x, t) = \frac{1}{4\pi\rho} (3\gamma_n\gamma_m - \delta_{nm}) \frac{1}{R^3} \int_{R/\alpha}^{R/\beta} \tau' F(t - \tau') d\tau' + \frac{1}{4\pi\rho\alpha^2} \gamma_n\gamma_m \frac{1}{R} F(t - \frac{R}{\alpha}) - \frac{1}{4\pi\rho\beta^2} (\gamma_n\gamma_m - \delta_{nm}) \frac{1}{R} F(t - \frac{R}{\beta}) \quad (6.1)$$

gdzie:

R – odległość od punktu obserwacji x do punktu przyłożenia siły,

γ_n i γ_m – cosinusy kierunkowe dla wektora x - ζ ,

δ – delta Kroneckera,

α i β – prędkości fali P i fali S w ośrodku o gęstości ρ .

Pierwszy człon w powyższym równaniu opisuje tzw. bliskie pole, a drugi tzw. pole dalekie (oddzielnie dla fali P i dla fali S). Czynniki radiacji dla pola dalekiego w tym modelu wyraża człon $1/R$, a dla pola bliskiego człon $1/R^3$.

Wyniki wieloletnich badań wykazały, że w przypadku silnych zjawisk sejsmicznych, a więc istotnych z uwagi na oddziaływania sejsmiczne na powierzchnię, ma się do czynienia z radiacją równoważną podwójnej parze sił. Dlatego, w powyższej zależności, należy wprowadzić mechanizm podwójnej pary sił zamiast siły pojedynczej, dla której rozwiązanie podał Stokes. Przy przyjęciu tensora momentu sejsmicznego M jako wartości stałej na całej powierzchni źródła, dla której liniowy rozmiar jest mały w porównaniu do długości fali, wektor przemieszczenia spowodowany działaniem podwójnej pary sił opisanej tensorem M_{pq} w źródle można wyrazić równaniem (Aki, Richards 1980)

$$u_n(x, t) = RP^{\text{near}} \frac{1}{4\pi\rho} \frac{1}{R^4} \int_{R/\alpha}^{R/\beta} \tau M_{pq}(t - \tau) d\tau + RP^{\text{inter}(\alpha)} \frac{1}{4\pi\rho\alpha^2} \frac{1}{R^2} M_{pq}(t - \frac{R}{\alpha}) - RP^{\text{inter}(\beta)} \frac{1}{4\pi\rho\beta^2} \frac{1}{R^2} M_{pq}(t - \frac{R}{\beta}) + RP^{\text{far}(P)} \frac{1}{4\pi\rho\alpha^3} \frac{1}{R} \frac{d}{dt} M_{pq}(t - \frac{R}{\alpha}) - RP^{\text{far}(S)} \frac{1}{4\pi\rho\beta^3} \frac{1}{R} \frac{d}{dt} M_{pq}(t - \frac{R}{\beta}) \quad (6.2)$$

W powyższym wzorze RP^{near} jest wyrażeniem radiacji w bliskim polu, która z odległością zmienia się jak $1/R^4$. $RP^{\text{inter}(\alpha)}$ i $RP^{\text{inter}(\beta)}$ są czynnikami radiacji w polu pośrednim, zmieniającymi się z odległością jak $1/R^2$ odpowiednio dla fali P i S, a $RP^{\text{far}(P)}$ i $RP^{\text{far}(S)}$ są czynnikami radiacji w polu dalekim dla fal P i S, charakteryzującym się spadkiem jak $1/R$. Praktycznie więc bliskie pole falowe maleje wielokrotnie szybciej niż pole dalekie czy też pole pośrednie. Ponadto, czynniki opisujące radiację są kombinacją cosinusów kierunkowych γ_j . Przykładowo poniżej zostały podane rozwiązania dla prostych przypadków, gdy jest obliczane przemieszczenie w punkcie x , w odległości R od źródła i dla cosinusów kierunkowych γ_x , γ_y i γ_z .

Po zredukowaniu wyrazów dla dalekiego pola, otrzymuje się dla przemieszczeń w bliskim polu następujące wyrażenie

$$u_x^{\text{near}}(x;t) = \frac{1}{4\pi\rho} \frac{1}{R^4} \left\{ 30\gamma_x\gamma_y(\gamma_x + \gamma_y) - 6\gamma_z \right\} A\mu \int_{R/\alpha}^{R/\beta} \tau[u](t-\tau) d\tau \quad (6.3)$$

$$u_x(t) = \frac{u_x^{\text{near}}(x;t)}{30\gamma_x\gamma_y(\gamma_x + \gamma_y) - 6\gamma_z}$$

Należy nadmienić, że w polu bliskim, radiacji pola sejsmicznego nie dzieli się ze względu na fale poprzeczne S i podłużne P.

W polu pośrednim czynnik radiacji sejsmicznej zmienia się z odległością, jak $1/R^2$. Dla fali P przemieszczenie cząsteczki w kierunku x opisuje zależność:

$$\begin{aligned} u_x^{P(\text{inter})}(x;t) &= \\ &= \frac{1}{4\pi\rho\alpha^2} \frac{1}{R^2} \left\{ 12\gamma_x\gamma_z(\gamma_x + \gamma_y)M_{yz}\left(t - \frac{R}{\alpha}\right) - 2\gamma_zM_{yz}\left(t - \frac{R}{\alpha}\right) \right\} = \\ &= \frac{1}{4\pi\rho\alpha^2} \frac{1}{R^2} A\mu \left\{ 12\gamma_x\gamma_z(\gamma_x + \gamma_y) - 2\gamma_z \right\} \left[u \right] \left(t - \frac{R}{\alpha} \right) \end{aligned} \quad (6.4)$$

$$u_x^{\text{inter(p)}}(t) = \frac{u_x^{\text{inter(p)}}(x;t)}{\left\{ 12\gamma_x\gamma_z(\gamma_x + \gamma_y) - 2\gamma_z \right\}} \quad (6.5)$$

Z kolei w polu dalekim czynnik radiacji zależy od chwilowych pochodnych czasowych w czasie $\tau = t - R/v$, gdzie: $v = \alpha$ dla fal P oraz $v = \beta$ dla fal S. Przykładowo w dalekim polu dla fal P otrzymuje się następujące wyrażenia do opisu przemieszczenia

$$\begin{aligned} u_x^{P(\text{far})}(x;t) &= \\ &= \frac{1}{4\pi\rho\alpha^3} \frac{1}{R} \left\{ \frac{d}{dt} [M_{xz} + M_{zx}] \gamma_x\gamma_z\gamma_x + [M_{yz} + M_{zy}] \gamma_y\gamma_z\gamma_x \right\} = \\ &= \frac{1}{4\pi\rho\alpha^3} \frac{1}{R} \left\{ 2\mu A\gamma_x \left[\gamma_x\gamma_z \frac{d}{dt} [u_x] \left(t - \frac{R}{\alpha} \right) + \gamma_y\gamma_z \frac{d}{dt} [u_y] \left(t - \frac{R}{\alpha} \right) \right] \right\} = \\ &= u_x^P(t) \gamma_x \left\{ \gamma_x\gamma_z + \gamma_y\gamma_z \right\} \end{aligned} \quad (6.6)$$

Składowa x pola przemieszczeń w punkcie obserwacji x jest w tym przypadku wynikiem działania podwójnej pary sił, para (1,3) i para (2,3). Z równania powyższego, po różniczkowaniu, można otrzymać prędkość drgań cząstek górotworu (czyli tę wartość, która jest rejestrowana przez sejsmometri).

Powyższe rozważania wskazują na ważny praktycznie podział pola przemieszczeń na część bliską – tzw. pole statyczne oraz część daleką – tzw. pole dynamiczne. W przypadku ogniska punktowego jest rozważane dalekie pole przemieszczeń, jeśli jest spełniony warunek (Brune 1976)

$$\frac{\beta}{\omega R} < 1 \quad (6.7)$$

gdzie:

β – prędkość propagacji fali poprzecznej,
 ω – częstość kołowa.

Również dla innych modeli ognisk o skończonych rozmiarach, przybliżone zależności dla dalekiego pola przemieszczeń są ważne jedynie na odległościach wyraźnie większych w porównaniu z rozmiarami tych ognisk.

Tak więc, przy założeniu tego samego mechanizmu ogniska wstrząsu i identycznych wartości gęstości ośrodka oraz takich samych wartości prędkości fal podłużnych i poprzecznych, wpływ na wielkość amplitudy drgań ma jedynie czynnik RP/r , gdzie RP to współczynnik radiacji, a r to odległość ognisko–stanowisko pomiarowe. Współczynnik ten ma jednak wymiar metr^{-1} , a więc jest jednostką wymiarową. W celu określenia rozkładu tego współczynnika na powierzchni terenu, ale tak, aby był on bezwymiarowy, przyjęto następujący sposób. Współczynnik RP/r zostaje dodatkowo pomnożony przez stałą wartość równą głębokości ogniska h , czyli tworzy się nową wielkość, która jest bezwymiarowa. Nowy współczynnik ma tę zaletę, że jego wartości w różnych punktach powierzchni terenu mogą być ze sobą porównywane. **Tam, gdzie wartości współczynnika $RP/(r/h)$ są większe, proporcjonalnie większa powinna być amplituda zarejestrowanych amplitud przyspieszenia.** Tak więc rozkład izolinii współczynnika $RP/(r/h)$ pozwala na interpretację obserwowanej zmienności rozkładu amplitud przyspieszenia drgań na powierzchni, a tym samym pozwala na ocenę efektu kierunkowości radiacji sejsmicznej uwarunkowanej różnicami w mechanizmie ognisk wstrząsów.

Na potrzeby realizowanych badań nad kierunkowością radiacji sejsmicznej ognisk wstrząsów górniczych opracowano algorytm z użyciem biblioteki do obrazowania przestrzennego o nazwie OpenGL (*open graphics library*) oraz specjalistycznego programu. Następnie posłużyły one do wizualizacji przestrzennego obrazowania radiacji źródła sejsmicznego w strefie dalekiej dla mechanizmu podwójnej pary sił oraz na powierzchni terenu.

6.2. Radiacja fal sejsmicznych w obszarze epicentralnym wstrząsów zaistniałych w Górnśląskim Zagłębiu Węglowym i Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym

Istota obliczania tensora momentu sejsmicznego bazuje na różnicach, jakie występują w zapisach amplitud, szczególnie znaków pierwszych wstąpień fali sejsmicznej, na sejsmogramach cyfrowych rejestrowanych przez podziemne stacje sejsmiczne. W uproszczeniu można powiedzieć, że **tensor momentu sejsmicznego jest obliczany w oparciu o efekt wynikający z kierunkowości radiacji energii ze źródła sejsmicznego i odwrotnie tensor momentu sejsmicznego określa charakterystykę radiacji energii ze źródła.** Tak więc, ten sam efekt kierunkowości radiacji energii sejsmicznej może posłużyć do badania jego wpływu na wielkości amplitud

przyspieszeń drgań rejestrowanych na powierzchni terenu przez powierzchniowe stanowiska sejsmometryczne.

W sejsmologii górniczej, od dawna, jest znane zjawisko występowania wyraźnych dysproporcji między maksymalnymi amplitudami na sejsmogramach, rejestrowanymi na stanowiskach pomiarowych znajdujących się na różnych kierunkach (azymutach), w stosunku do źródła sejsmicznego. Podobny efekt może być obserwowany także na powierzchni terenu, przy czym jego charakter może być znacznie bardziej złożony niż dla stanowisk podziemnych. Jednym z głównych czynników, który dodatkowo wpływa na wartości amplitud drgań rejestrowanych na powierzchni terenu jest wspomniany już efekt amplifikacji. Ujmując to zjawisko bardziej ogólnie należy stwierdzić, że amplifikacja jest efektem wpływającym na poziom amplitud drgań na powierzchni wskutek różnic parametrów fizycznych i geometrycznych opisujących strukturę warstwy przypowierzchniowej. Jednak oprócz amplifikacji, na wartości amplitud drgań rejestrowanych na powierzchni terenu mogą mieć wpływ następujące zjawiska związane chociażby tylko z propagacją fal sejsmicznych, a mianowicie:

- zakrzywianie promienia sejsmicznego na skutek niejednorodności ośrodka,
- konwersja fal poprzecznych SV na podłużne,
- efekt odbicia i załamania fal na granicach ośrodków.

W większości przypadków można jednak przyjąć, że promienie sejsmiczne mogą być w przybliżeniu uznane za prostoliniowe oraz pominąć efekt odbicia fal sejsmicznych, jeśli założy się, że odległość horyzontalna między źródłem a odbiornikiem drgań jest niewielka – dla wstrząsów górniczych, nieprzekraczająca kilku kilometrów. Należy jednak być świadomym przyjętych uproszczeń oraz tego, że w rzeczywistości mogą występować sytuacje, w których przyjęte założenia nie są spełnione.

Analizę zjawiska kierunkowości radiacji sejsmicznej ognisk wstrząsów górniczych zaistniałych w obszarze GZW i LGOM z wykorzystaniem współczynnika $RP/(r/h)$ przeprowadzono przy założeniu dalekiego pola falowego oraz mechanizmu ogniska typu podwójnej pary sił. Takie założenia poczyniono dla wszystkich analizowanych zjawisk sejsmicznych.

Przykładowe wyniki obliczeń dla danych z obszaru GZW i z obszaru LGOM przedstawiono poniżej.

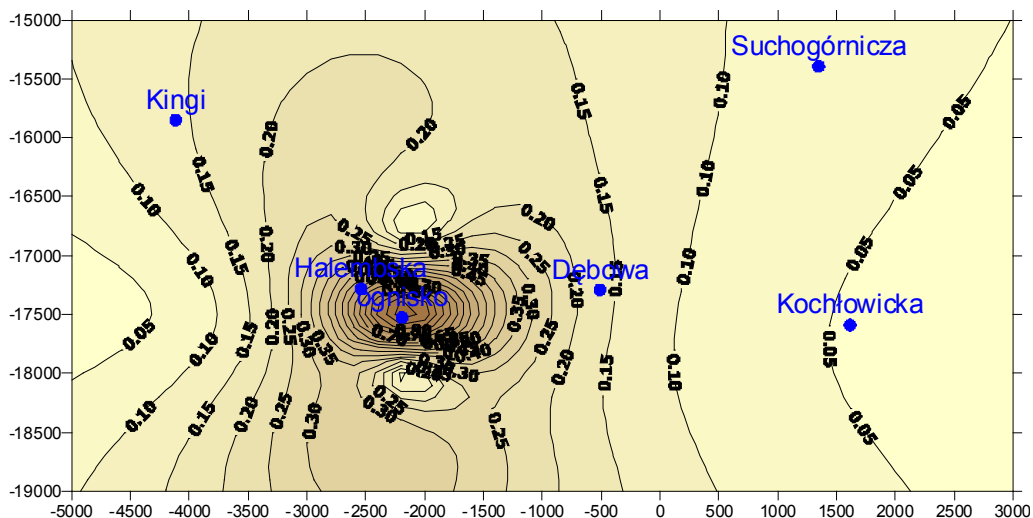
GZW – wstrząs o energii $9 \cdot 10^7$ J z dnia 09.08.2003 roku

Kierunkowość radiacji fal sejsmicznych określono na podstawie wyników rozwiązania mechanizmu ogniska wstrząsu (rys. 5.3b). Dla stanowisk położonych najbliżej ogniska, maksymalne amplitudy przyspieszeń drgań zarejestrowanych na powierzchni terenu oraz maksymalne amplitudy przyspieszeń zarejestrowanych drgań po odjęciu wzmocnienia wynikającego z amplifikacji przez nadkład czwartorzędowy przedstawiono w tablicy 6.1. Wynikają z niej różnice w wartościach maksymalnych amplitud drgań spowodowane zarówno zmniejszaniem się amplitud z odległością, jak i kierunkowością radiacji energii sejsmicznej.

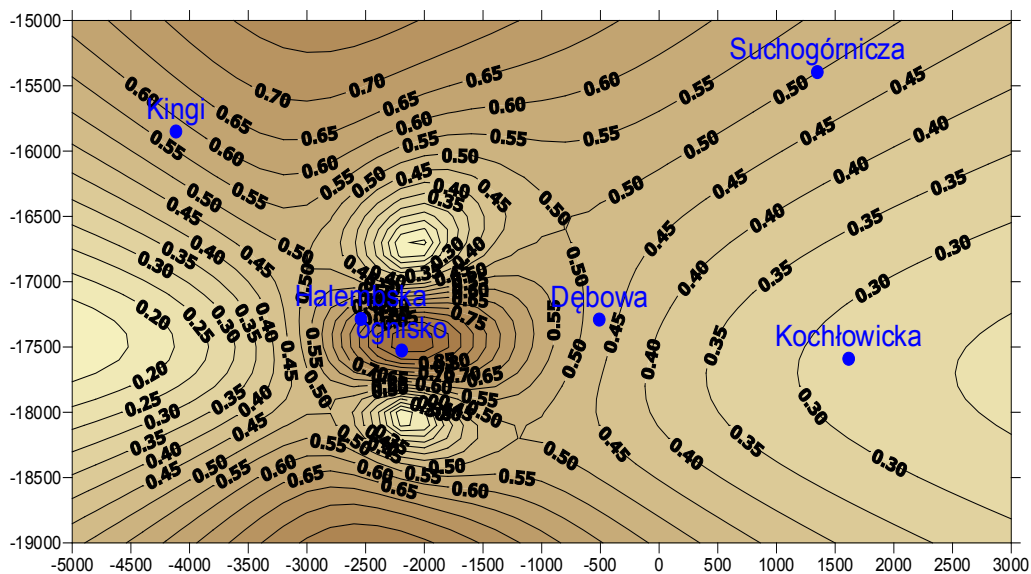
W celu porównania pomierzonych wartości amplitud z teoretycznymi wartościami amplitud, wynikającymi z kierunkowości źródła sejsmicznego i rozpraszania geometrycznego, został obliczony rozkład współczynnika $RP/(r/h)$ dla fali poprzecznej S na powierzchni terenu (rys. 6.1). Wynika z niego, że największe amplitudy drgań powinny zostać zarejestrowane na stanowisku pomiarowym usytuowanym przy ulicy Halembskiej, następnie na stanowisku przy ulicach: Dębowej, Kingi, Kochłowskiej i Suchogórnicy. Powyższe rezultaty są zgodne z pomierzonymi maksymalnymi amplitudami drgań zamieszczonymi w tablicy 6.1. Obserwowane dysproporcje w pomierzonych wartościach maksymalnych amplitud można więc wyjaśnić jako efekt kierunkowej radiacji energii ze źródła sejsmicznego i rozpraszania geometrycznego. Dodatkowo na rysunku 6.2 przedstawiono rozkład samego współczynnika radiacji na powierzchni terenu dla omawianego wstrząsu sejsmicznego i obliczonego mechanizmu ogniska, a na rysunkach 6.3 a–j trójwymiarowe współczynniki radiacji RP dla fali poprzecznej S. Z zamieszczonych rysunków również wynika wniosek, że radiacja miała charakter kierunkowy, co potwierdzają zarówno wyniki pomiarów, jak i obliczenia teoretyczne.

Tablica 6.1. Przyspieszenie drgań gruntu dla wstrząsu o energii $9 \cdot 10^7$ J z dnia 09.08.2003 roku

Rejon badań (ulica)	Odległość epicentralna d , km	Przyspieszenia pomierzone mm/s ²				Przyspieszenia po redukcji amplifikacji, mm/s ²			
		$\bar{a}_{px}$	$\bar{a}_{py}$	$\bar{a}_{pz}$	$\bar{a}_{pwyp}$	$\bar{a}_{zx}$	$\bar{a}_{zy}$	$\bar{a}_{zz}$	$\bar{a}_{zwyp}$
Halembaska	0,39	250	930	290	1006	192	715	223	774
Kingi	2,52	62	98	95	150	43	68	66	103
Dębowa	1,77	88	123	134	202	57	79	86	130
Kochłowska	3,88	16	18	21	32	13	17	17	27
Suchogórnica	4,20	12	11	9	19	7	6	5	11

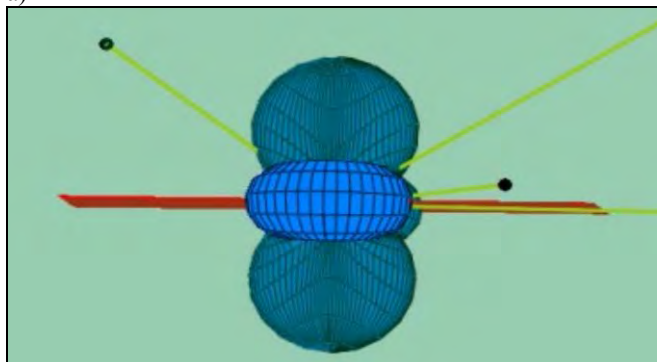


Rys. 6.1. Rozkład współczynnika $RP/(r/h)$ dla fali poprzecznej S na powierzchni terenu obliczony dla wstrząsu o energii sejsmicznej $9 \cdot 10^7$ J z dnia 09.08.2003 roku

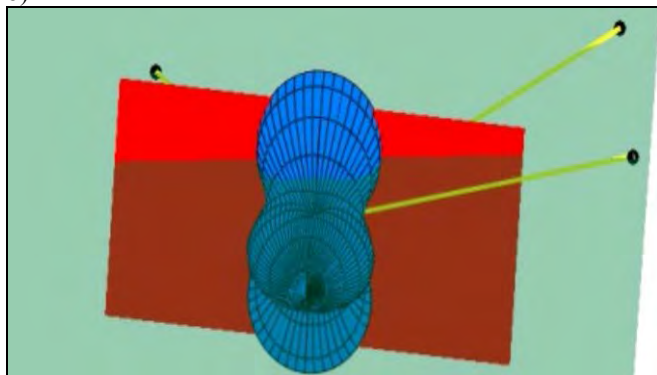


Rys. 6.2. Rozkład współczynnika radiacji RP dla fali poprzecznej S na powierzchni terenu obliczony dla wstrząsu o energii sejsmicznej $9 \cdot 10^7$ J z dnia 09.08.2003 roku

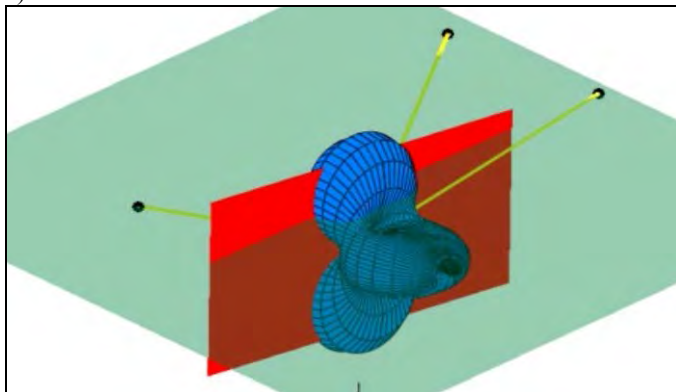
a)



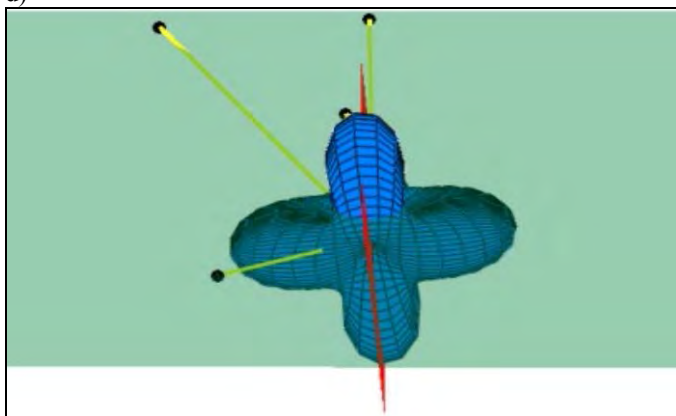
b)



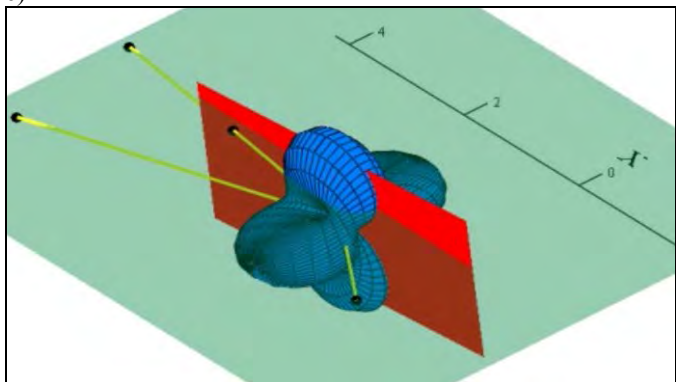
c)



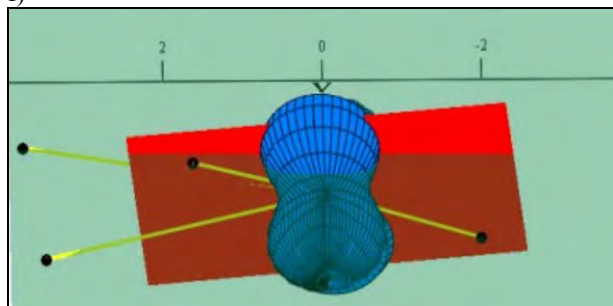
d)



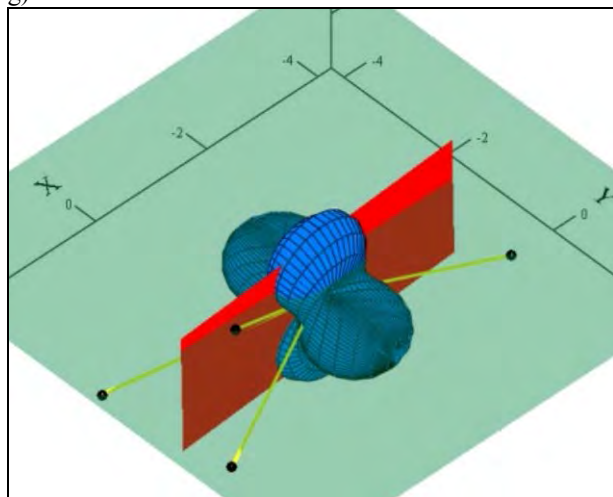
e)



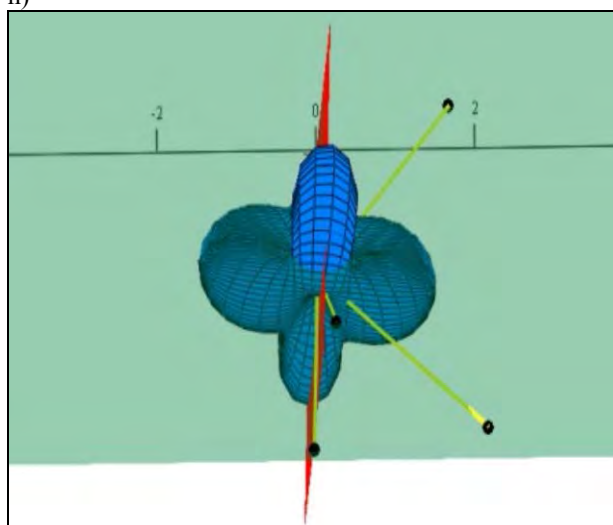
f)



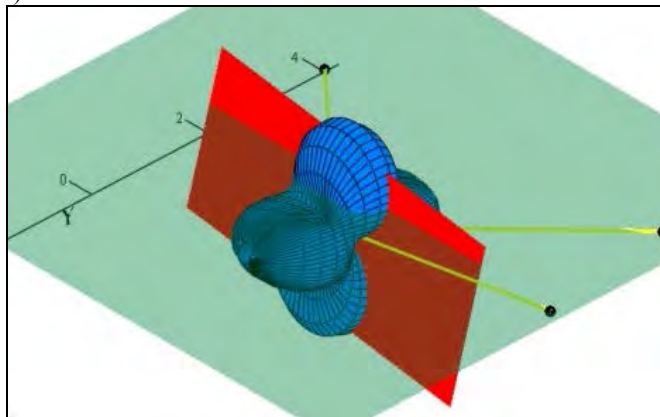
g)



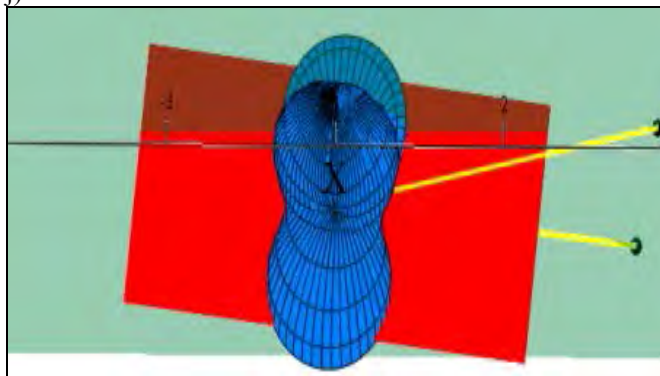
h)



i)



j)



Rys. 6.3a–j. Trójwymiarowe obrazy współczynnika radiacji amplitud RP w polu dalekim dla fali poprzecznej S dla wstrząsu z dnia 09.08.2003 r. o energii $9 \cdot 10^7$ J i mechanizmie ogniska przedstawionym na rysunku 5.3b: czarne punkty – stanowiska sejsmometryczne, płaszczyzna zielona – powierzchnia ziemi, płaszczyzna czerwona – płaszczyzna poślizgu dla mechanizmu podwójnej pary sił

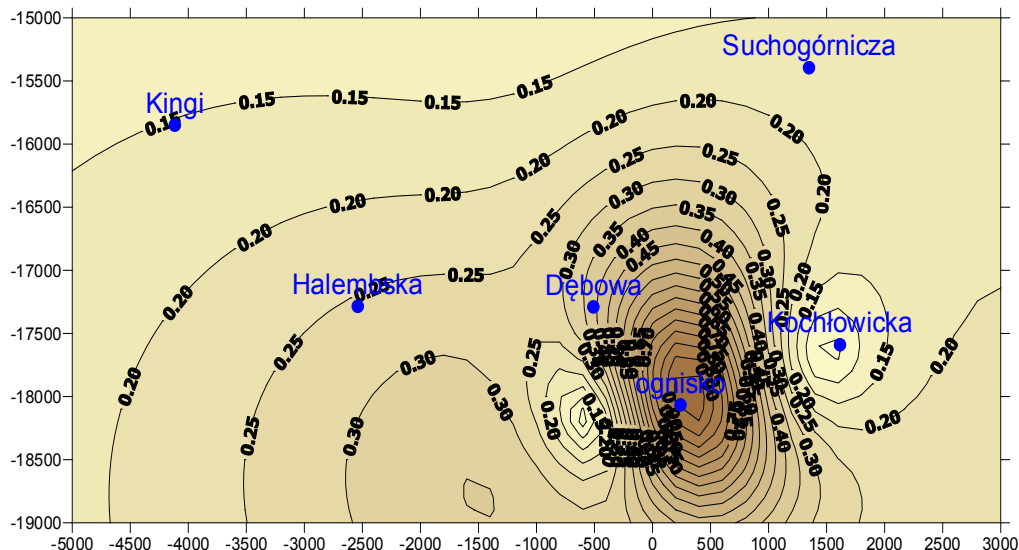
GZW – wstrząs o energii $8 \cdot 10^6$ J z dnia 18.12.2003 roku

Kierunkowość radiacji fal sejsmicznych określono na podstawie wyników rozwiązania mechanizmu ogniska wstrząsu, przedstawionych na rysunku 5.3c. Maksymalne amplitudy przyspieszeń drgań zarejestrowanych na powierzchni terenu oraz maksymalne amplitudy przyspieszeń zarejestrowanych drgań po odjęciu wzmocnienia wynikającego z amplifikacji przez nadkład czwartorzędowy przedstawiono w tabelcy 6.2. Z tabelcy dla najbliższych stanowisk wynikają różnice w wartościach maksymalnych amplitud drgań spowodowane zarówno zmniejszaniem się amplitud z odległością, jak i kierunkowością radiacji energii sejsmicznej. W celu porównania pomierzonych wartości amplitud z teoretycznymi wartościami amplitud, wynikającymi z kierunkowości źródła sejsmicznego i rozpraszania geometrycznego, został obliczony rozkład współczynnika $RP/(r/h)$ dla fali poprzecznej S na powierzchni terenu (rys. 6.4). Wynika z niego, że największe amplitudy drgań powinny zostać

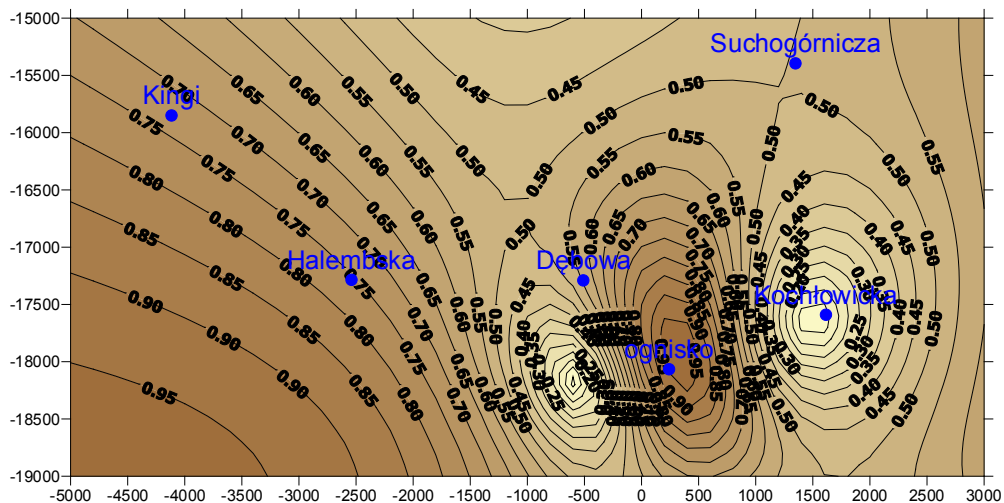
zarejestrowane na stanowisku pomiarowym usytuowanym przy ulicy Dębowej, następnie na stanowisku przy ulicach: Halembskiej, Suchogórnicy, Kingi i Kochłowskiej. Powyższe rezultaty są zgodne z pomierzonymi maksymalnymi amplitudami drgań zamieszczonymi w tablicy 6.2, z wyjątkiem niewielkich różnic występujących na stanowiskach przy ul. Kingi i Kochłowskiej. Obserwowane dysproporcje w pomierzonych wartościach maksymalnych amplitud można więc wyjaśnić jako efekt kierunkowej radiacji energii ze źródła sejsmicznego i rozpraszania geometrycznego. Dodatkowo na rysunku 6.5 przedstawiono rozkład samego współczynnika radiacji na powierzchni terenu dla omawianego wstrząsu sejsmicznego i obliczonego mechanizmu ogniska, a na rysunkach 6.6a–j trójwymiarowe współczynniki radiacji RP dla fali poprzecznej S . Z zamieszczonych rysunków również wynika wniosek, że radiacja miała charakter kierunkowy i potwierdzają to zarówno wyniki pomiarów, jak i obliczenia teoretyczne.

Tablica 6.2. Przyspieszenie drgań gruntu dla wstrząsu o energii $8 \cdot 10^6$ J z dnia 18.12.2003 roku

Rejon badań (ulica)	Odległość epicentralna d , km	Przyspieszenia pomierzone mm/s^2				Przyspieszenia po redukcji amplifikacji, mm/s^2			
		$\bar{a}_{px}$	$\bar{a}_{py}$	$\bar{a}_{pz}$	$\bar{a}_{pwyp}$	$\bar{a}_{zx}$	$\bar{a}_{zy}$	$\bar{a}_{zz}$	$\bar{a}_{zwyp}$
Halembaska	2,85	81	92	110	165	62	71	85	127
Kingi	4,66	13	21	27	37	9	14	19	25
Dębowa	0,82	146	171	221	315	94	110	143	203
Kochłowska	1,33	17	18	25	35	13	20	20	31
Suchogórnica	2,17	25	40	55	72	15	24	32	43

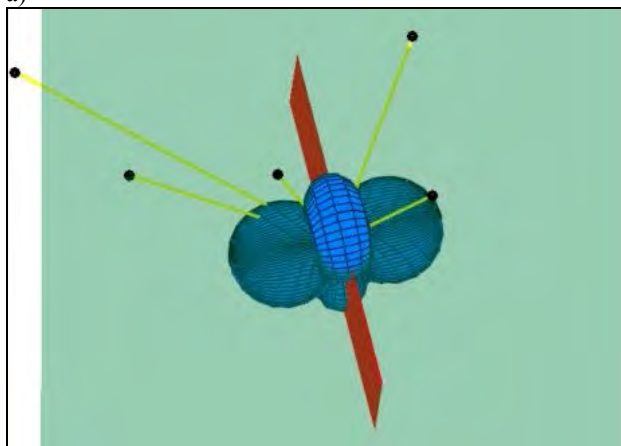


Rys. 6.4. Rozkład współczynnika $RP/(r/h)$ dla fali poprzecznej S na powierzchni terenu obliczony dla wstrząsu o energii sejsmicznej $8 \cdot 10^6$ J z dnia 18.12.2003 roku

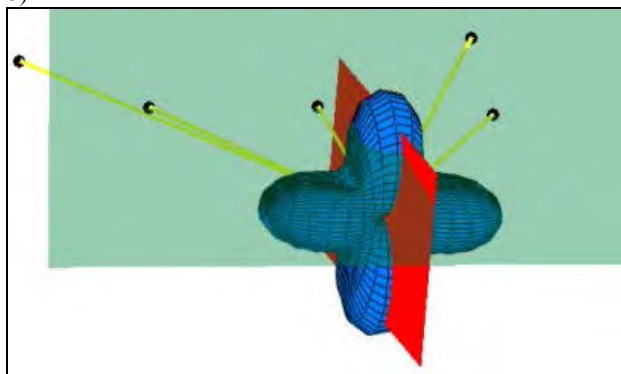


Rys. 6.5. Rozkład współczynnika radiacji RP dla fali poprzecznej S na powierzchni terenu obliczony dla wstrząsu o energii sejsmicznej $8 \cdot 10^6$ J z dnia 18.12.2003 roku

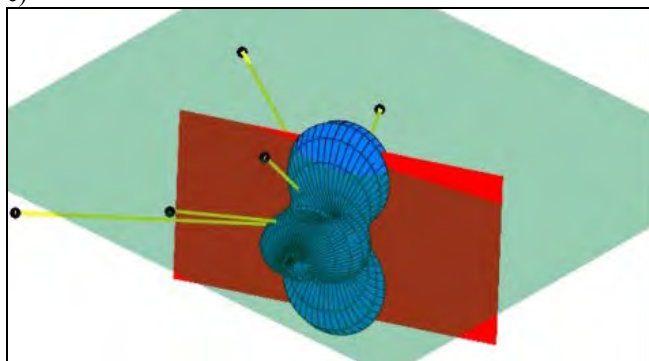
a)



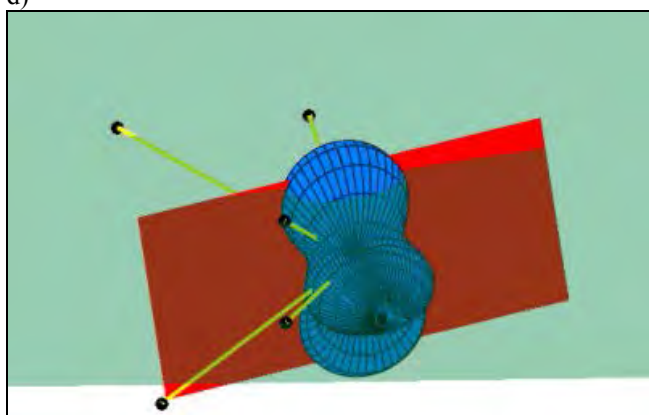
b)



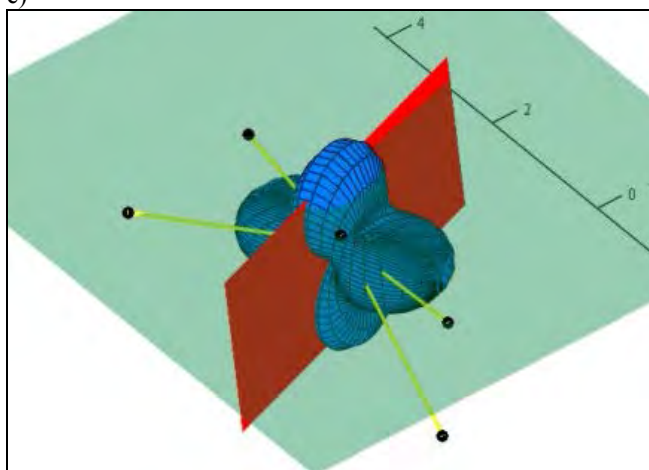
c)



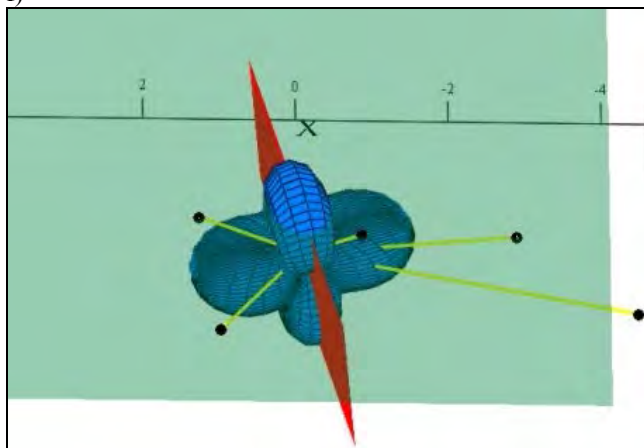
d)



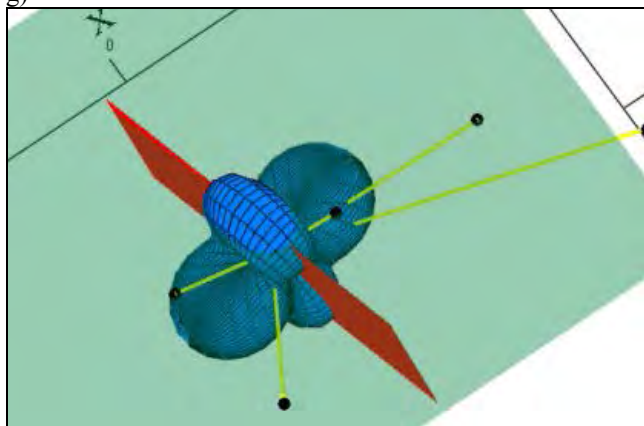
e)



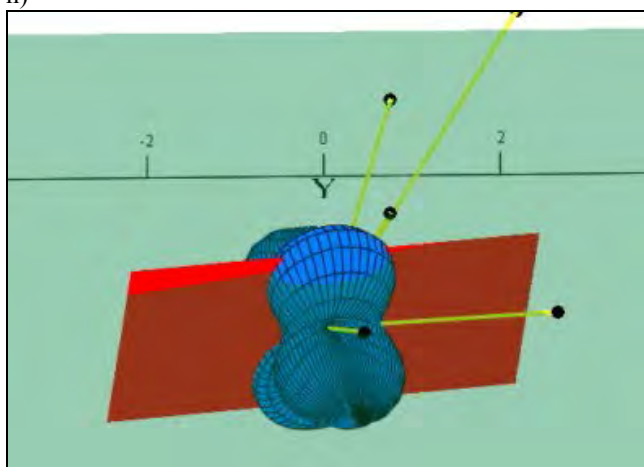
f)



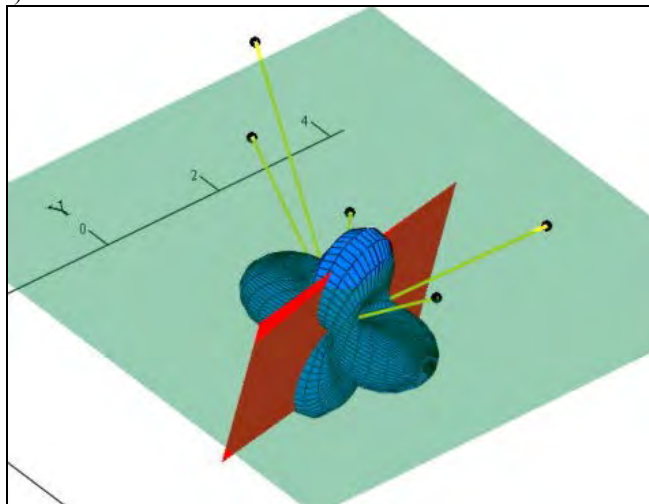
g)



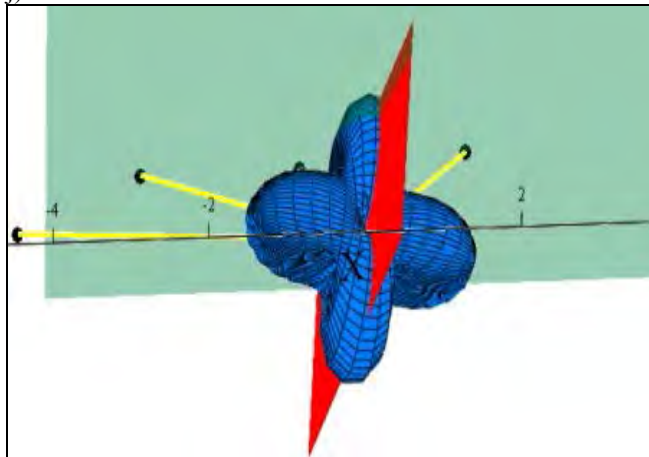
h)



i)



j)



Rys. 6.6a–j. Trójwymiarowe obrazy współczynnika radiacji amplitud RP w polu dalekim dla fali poprzecznej S dla wstrząsu o energii sejsmicznej $8 \cdot 10^6$ J z dnia 18.12.2003 roku i mechanizmie ogniska przedstawionym na rysunku 5.3c: czarne punkty – stanowiska sejsmometryczne; płaszczyzna zielona – powierzchnia ziemi; płaszczyzna czerwona – płaszczyzna poślizgu dla mechanizmu podwójnej pary sił

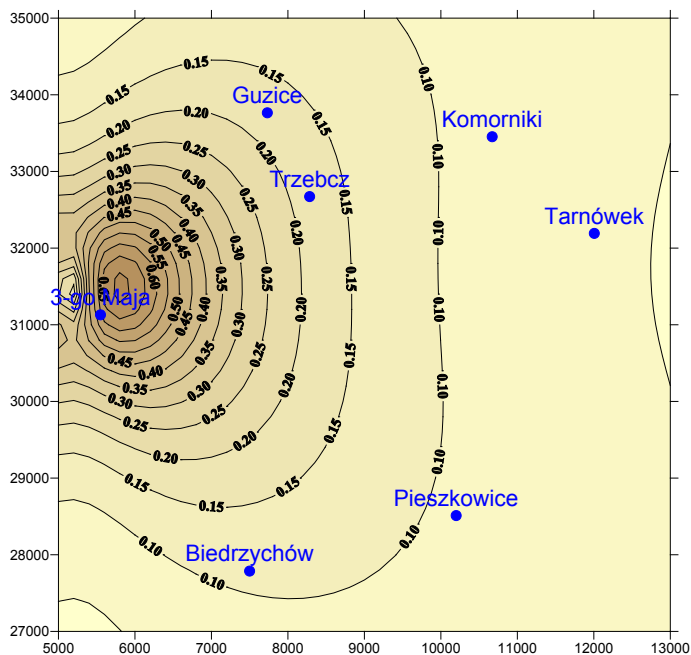
LGOM – wstrząs o energii $8 \cdot 10^8$ J z dnia 16.05.2004 roku

Wyniki obliczeń składowych tensora momentu sejsmicznego przedstawiono na rysunku 5.5c. Maksymalne amplitudy przyspieszeń drgań zarejestrowanych na powierzchni terenu oraz maksymalne amplitudy przyspieszeń zarejestrowanych drgań po redukcji wzmacnienia, wynikającego z amplifikacji drgań przez nadkład czwartorzędowy, zawiera tablica 6.3. Z zamieszczonej tablicy wynikają różnice w wartościach maksymalnych amplitud drgań spowodowane zarówno zmniejszaniem się amplitud z odległością, jak i kierunkowością radiacji energii sejsmicznej. W celu

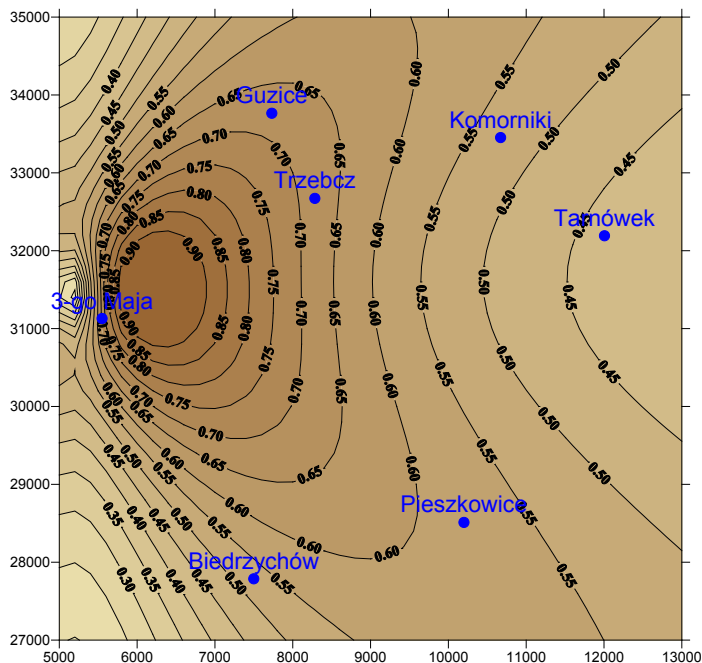
porównania pomierzonych wartości amplitud z teoretycznymi wartościami amplitud, wynikającymi z kierunkowości źródła sejsmicznego i rozpraszania geometrycznego, został obliczony rozkład współczynnika $RP/r/h$ dla fali poprzecznej S na powierzchni terenu (rys. 6.7). Wynika z niego, że największe amplitudy drgań powinny zostać zarejestrowane na stanowisku pomiarowym usytuowanym przy ulicy 3 Maja i na pozostałych stanowiskach w Polkowicach, następnie na stanowisku Trzebcz, Guzice, Biedrzychów, Pieszkowice, Komorniki i Tarnówek. Powyższe rezultaty generalnie zgadzały się z pomierzonymi maksymalnymi amplitudami drgań zamieszczonymi w tablicy 6.3, a jedyna dysproporcja wystąpiła między stanowiskami Komorniki i Pieszkowice. Obserwowane dysproporcje w pomierzonych wartościach maksymalnych amplitud można więc wyjaśnić jako efekt kierunkowej radiacji energii ze źródła sejsmicznego i rozpraszania geometrycznego. Dodatkowo na rysunku 6.8 przedstawiono rozkład samego współczynnika radiacji na powierzchni terenu dla omawianego wstrząsu sejsmicznego i obliczonego mechanizmu ogniska, a na rysunkach 6.9a–j trójwymiarowe współczynniki radiacji RP dla fali poprzecznej S. Z zamieszczonych rysunków również wynika wniosek, że radiacja miała charakter kierunkowy, co potwierdzają zarówno wyniki pomiarów, jak i obliczenia teoretyczne.

Tablica 6.3. Przyspieszenie drgań gruntu dla wstrząsu o energii $8 \cdot 10^8$ J z dnia 16.05.2004 roku

Rejon badań	Odległość epicentralna d , km	Przyspieszenia pomierzone mm/s^2				Przyspieszenia po redukcji amplifikacji, mm/s^2			
		$\bar{a}_{px}$	$\bar{a}_{py}$	$\bar{a}_{pz}$	$\bar{a}_{pwyp}$	$\bar{a}_{zx}$	$\bar{a}_{zy}$	$\bar{a}_{zz}$	$\bar{a}_{zwyp}$
ul. Kolejowa	1,1	402	442	795	994	335	368	663	829
ul. 3 Maja	0,6	940	1000	1600	2108	783	833	1333	1757
ul. Sosnowa	1,9	330	620	580	911	183	344	322	506
ul. Miedziana	0,9	540	480	880	1139	450	400	733	949
ul. Akacjowa	1,2	270	320	790	894	193	229	564	639
Biedrzychów	4,4	120	190	240	329	67	106	133	183
Grodowiec	8,4	60	64	66	110	50	53	55	91
Guzice	3,5	220	260	250	422	129	153	147	249
Komorniki	6,0	86	99	61	145	72	83	51	121
Moskorzyn	3,9	200	210	230	370	143	150	164	264
Pieszkowice	6,0	91	85	59	138	51	47	33	77
Tarnówek	7,0	44	36	38	68	37	30	32	57
Żuków	7,0	60	71	52	107	43	51	37	76
Trzebcz	3,6	210	240	170	361	131	150	106	226

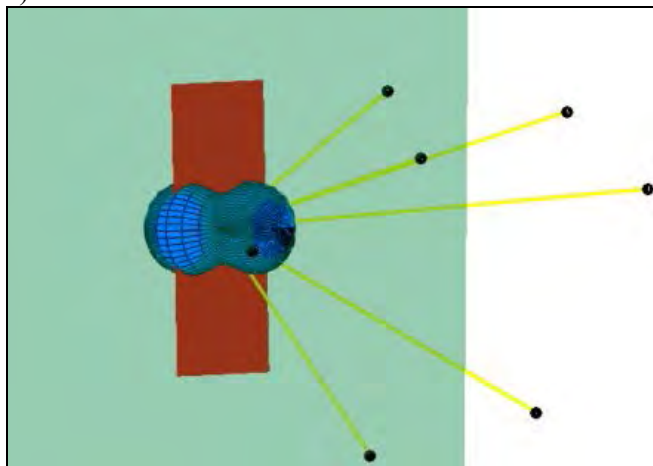


Rys. 6.7. Rozkład współczynnika $RP/r/h$ dla fali poprzecznej S na powierzchni terenu, obliczony dla wstrząsu o energii $8 \cdot 10^8$ J z dnia 16.05.2004 roku

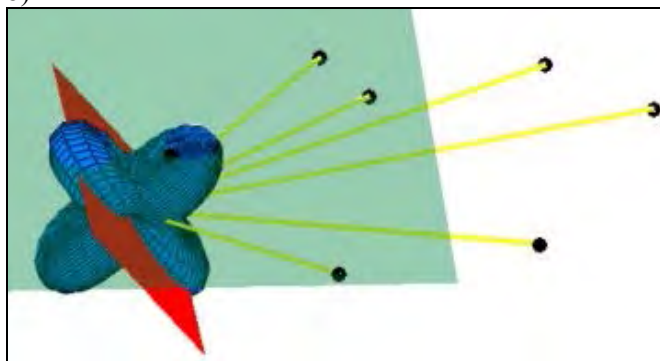


Rys. 6.8. Rozkład współczynnika radiacji RP dla fali poprzecznej S na powierzchni terenu, obliczony dla wstrząsu o energii $8 \cdot 10^8$ J z dnia 16.05.2004 roku

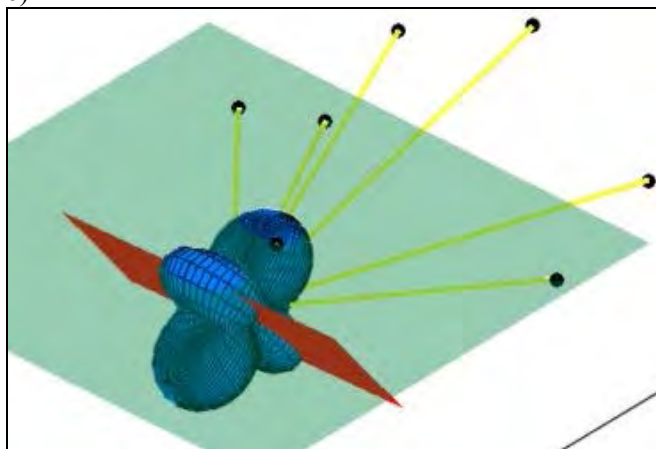
a)



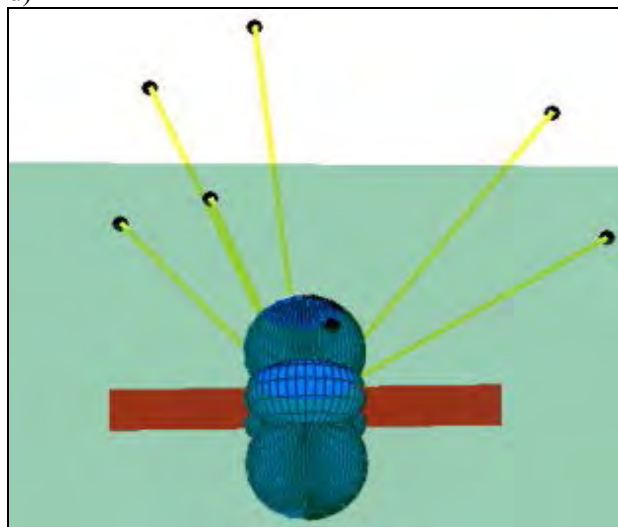
b)



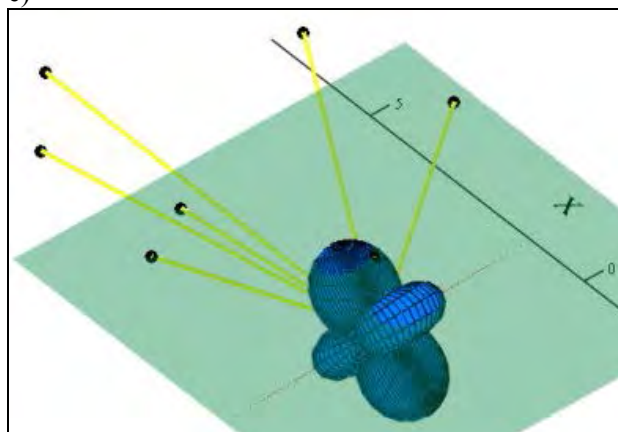
c)



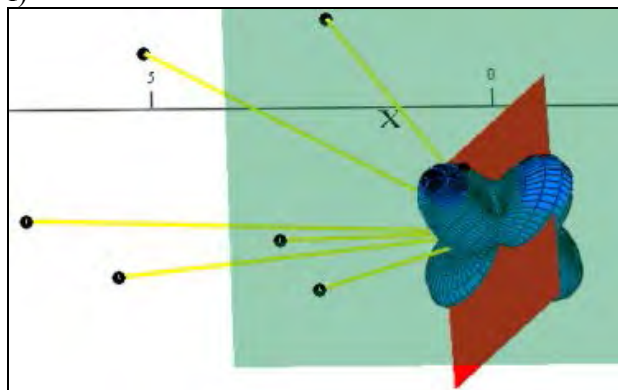
d)



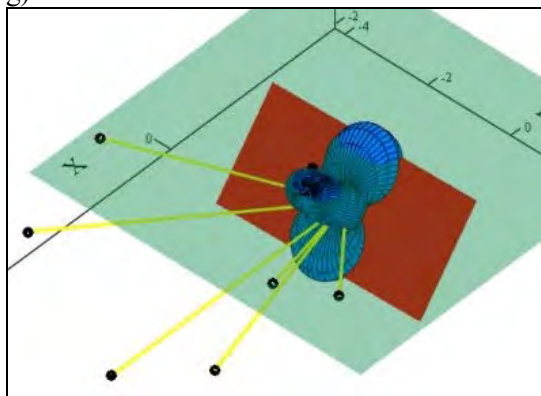
e)



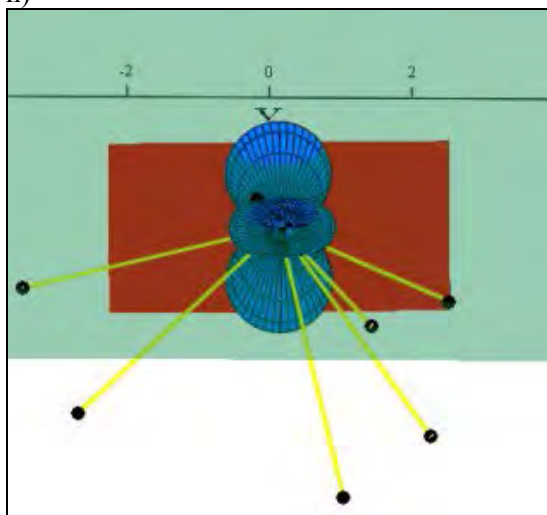
f)



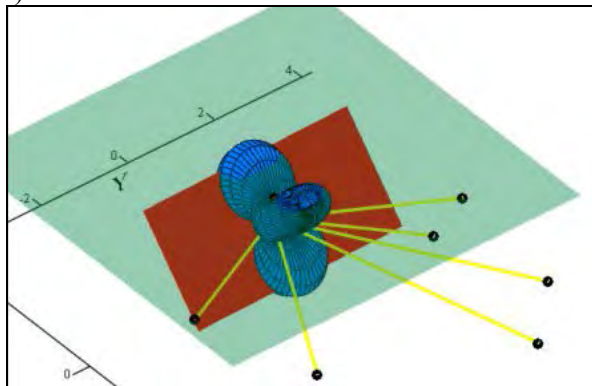
g)



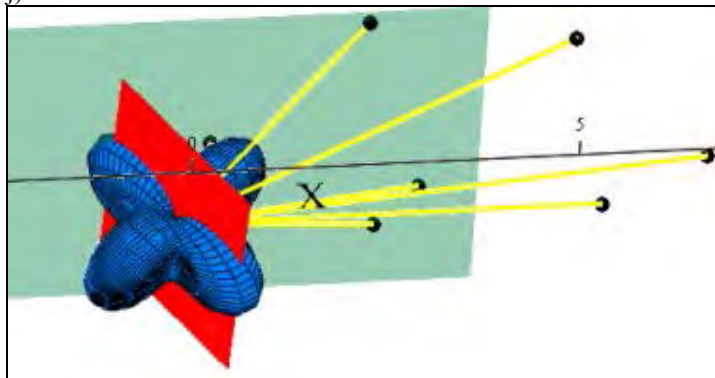
h)



i)



j)



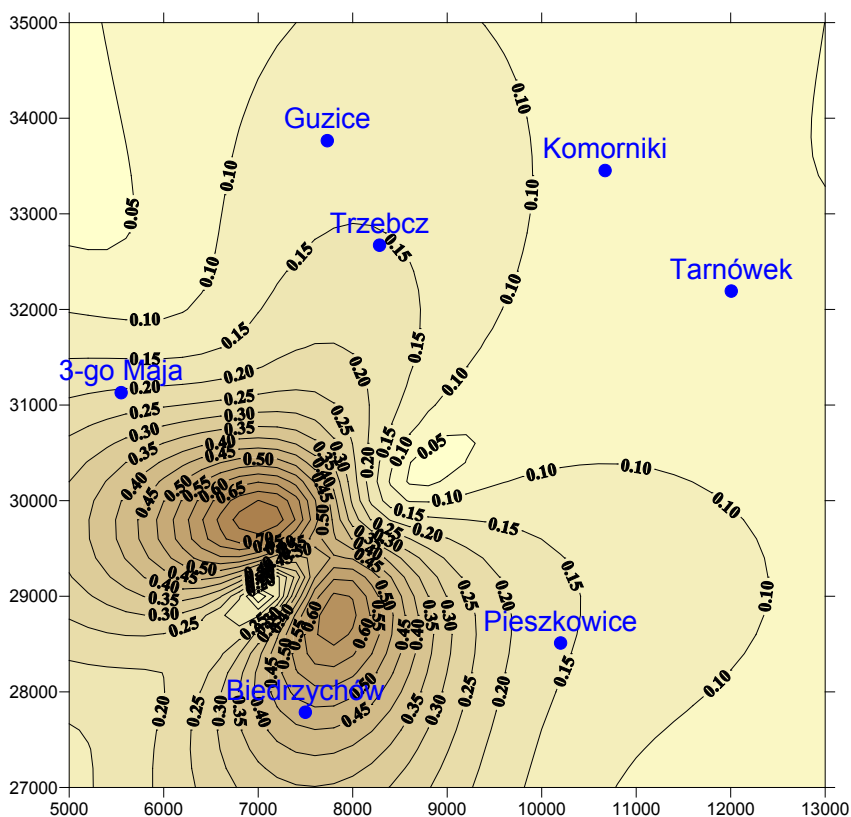
Rys. 6.9a-j. Trójwymiarowe obrazy współczynnika radiacji amplitud RP w polu dalekim dla fali poprzecznej S dla wstrząsu z dnia 16.05.2004 r. o energii $8 \cdot 10^8$ J i mechanizmie ogniska przedstawionym na rysunku 5.5c: czarne punkty – stanowiska sejsmometryczne, płaszczyzna zielona – powierzchnia ziemi, płaszczyzna czerwona – płaszczyzna poślizgu dla mechanizmu podwójnej pary sił

LGOM – wstrząs o energii $2 \cdot 10^8$ J z dnia 9.09.2004 roku

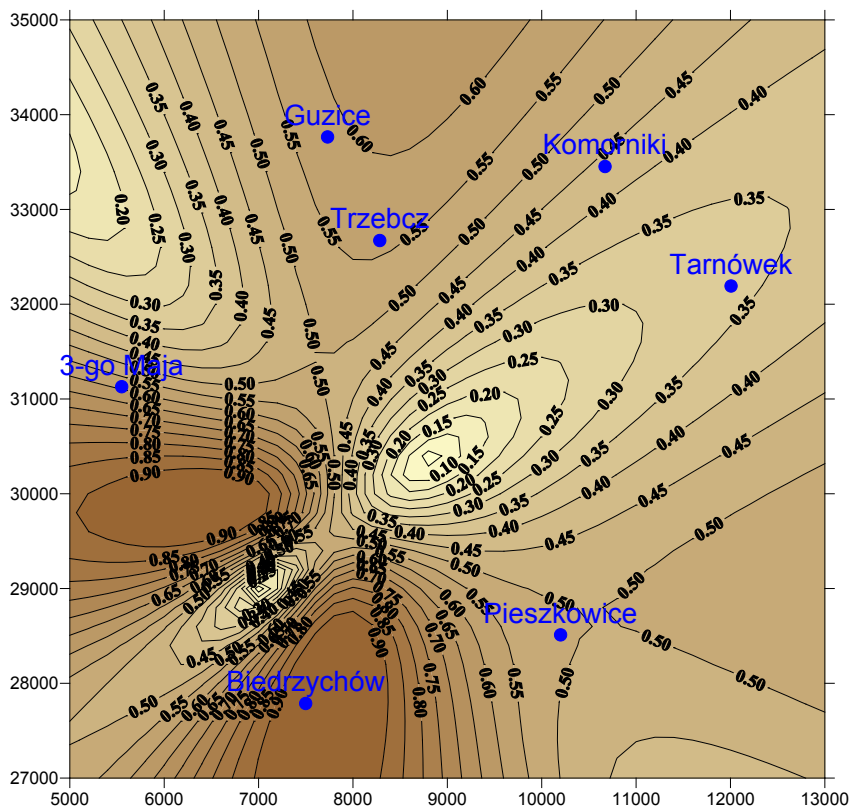
Wyniki obliczeń składowych tensora momentu sejsmicznego przedstawiono na rysunku 5.5e. Maksymalne amplitudy przyspieszeń drgań zarejestrowanych na powierzchni terenu oraz maksymalne amplitudy przyspieszeń zarejestrowanych drgań po redukcji wzmocnienia, wynikającego z amplifikacji przez nadkład czwartorzędowy, podano w tablicy 6.4. Rejestracja objęła następujące stanowiska powierzchniowe: Guzice, Tarnówek, Komorniki, ul. 3 Maja, Pieszkowice, Trzebcz i Biedrzychów. Z zamieszczonej tablicy wynikają różnice w wartościach maksymalnych amplitud drgań spowodowane zarówno zmniejszaniem się amplitud z odległością, jak i kierunkowością radiacji energii sejsmicznej. W celu porównania pomierzonych wartości amplitud z teoretycznymi wartościami amplitud, wynikającymi z kierunkowości źródła sejsmicznego i rozpraszania geometrycznego, został obliczony rozkład współczynnika $RP/r/h$ dla fali poprzecznej S na powierzchni terenu (rys. 6.10). Wynikało z niego, że największe amplitudy drgań powinny zostać zarejestrowane na stanowisku pomiarowym Biedrzychów, następnie na stanowisku ul. 3 Maja, Trzebcz, Pieszkowice, Guzice, Komorniki i Tarnówek. Powyższe rezultaty zgadzały się z pomierzonymi maksymalnymi amplitudami drgań zamieszczonymi w tablicy 6.4, a jedyna dysproporcja wystąpiła między stanowiskami Trzebcz i Pieszkowice. Obserwowane dysproporcje w pomierzonych wartościach maksymalnych amplitud można więc wyjaśnić jako efekt kierunkowej radiacji energii ze źródła sejsmicznego i rozpraszania geometrycznego. Dodatkowo na rysunku 6.11 przedstawiono rozkład samego współczynnika radiacji na powierzchni terenu dla omawianego wstrząsu sejsmicznego i obliczonego mechanizmu ogniska, a na rysunkach 6.12a–j trójwymiarowe współczynniki radiacji RP dla fali poprzecznej S. Z zamieszczonych rysunków również wynika wniosek, że radiacja miała charakter kierunkowy i potwierdzają to zarówno wyniki pomiarów, jak i obliczenia teoretyczne.

Tablica 6.4. Przyspieszenie drgań gruntu dla wstrząsu o energii $2 \cdot 10^8$ J z dnia 9.09.2004 roku

Rejon badań	Odległość epicentralna d , km	Przyspieszenia pomierzone mm/s ²				Przyspieszenia po redukcji amplifikacji, mm/s ²			
		a_{px}	a_{py}	a_{pz}	a_{pwyp}	a_{zx}	a_{zy}	a_{zz}	a_{zwyp}
ul. 3 Maja	2,5	140	210	130	284	117	175	108	237
ul. Sosnowa	1,3	470	240	300	607	261	133	167	337
ul. Miedziana	2,2	200	140	120	272	167	117	100	227
ul. Akacjowa	1,9	210	210	210	364	150	150	150	260
Biedrzychów	1,7	520	220	890	1054	289	122	494	586
Grodowiec	7,7	57	52	58	97	48	43	48	80
Guzice	4,3	140	120	82	202	82	71	48	119
Komorniki	5,1	110	50	47	130	92	42	39	108
Pieszkowice	2,9	190	100	100	237	106	56	56	132
Trzebcz	4,6	180	290	130	365	113	181	81	228

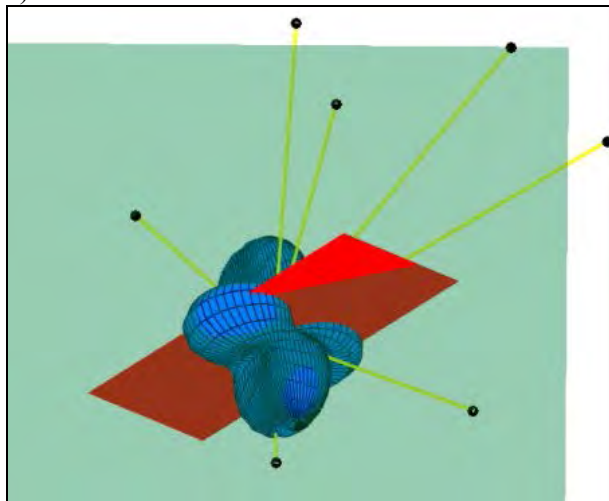


Rys. 6.10. Rozkład współczynnika RPl/rh dla fali poprzecznej S na powierzchni terenu, obliczony dla wstrząsu o energii $2 \cdot 10^8$ J z dnia 9.09.2004 roku

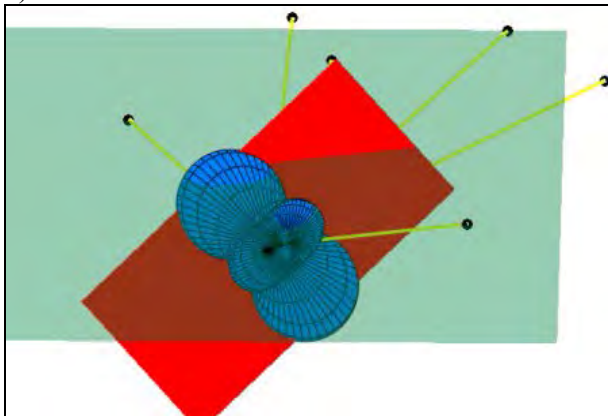


Rys. 6.11. Rozkład współczynnika radiacji RP dla fali poprzecznej S na powierzchni terenu, obliczony dla wstrząsu o energii $2 \cdot 10^8$ J z dnia 9.09.2004 roku

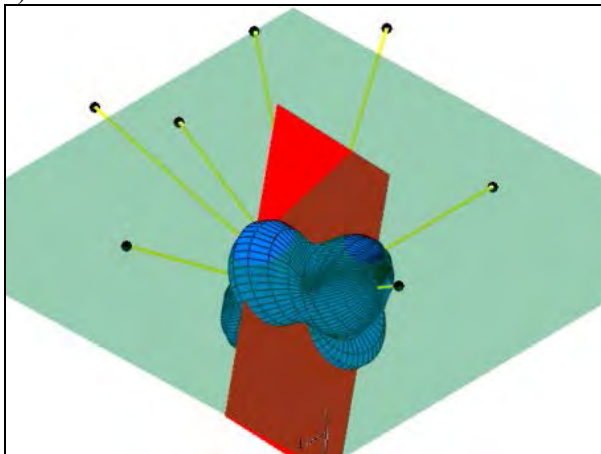
a)



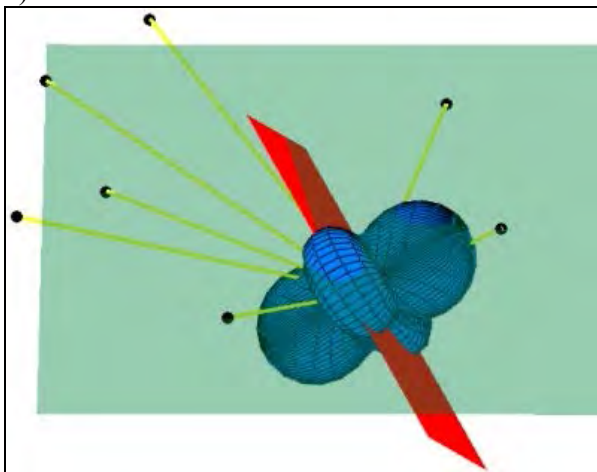
b)



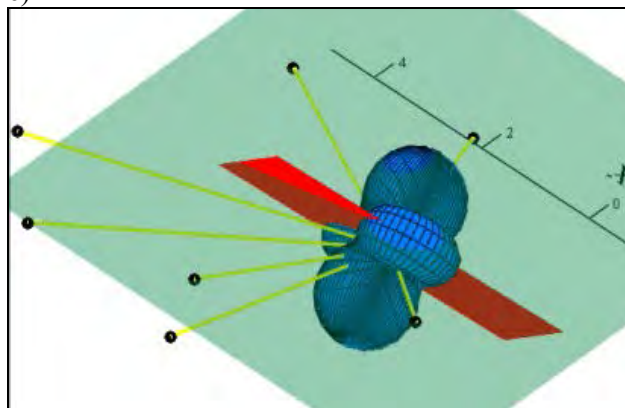
c)



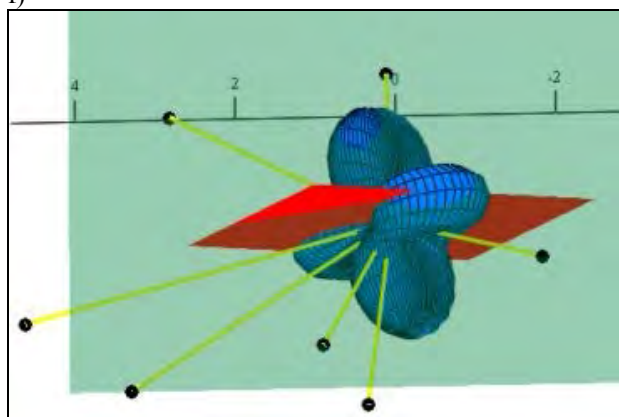
d)



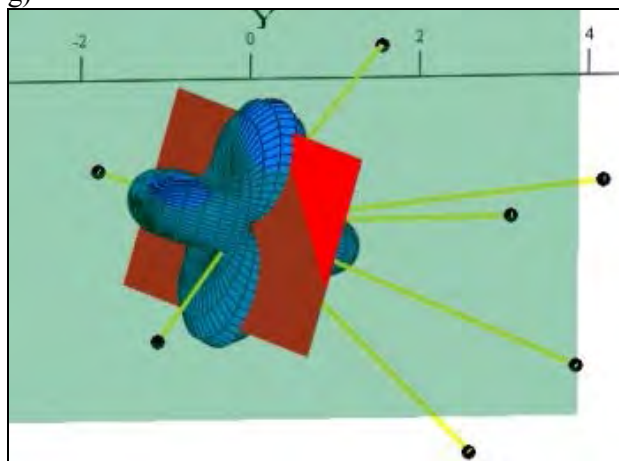
e)



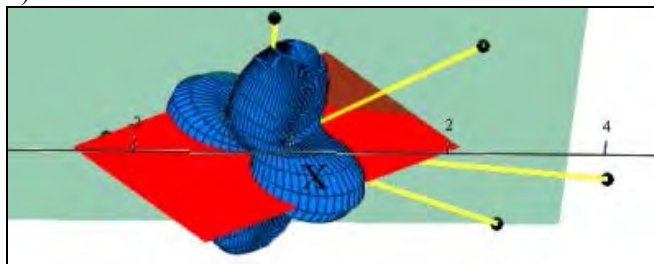
f)



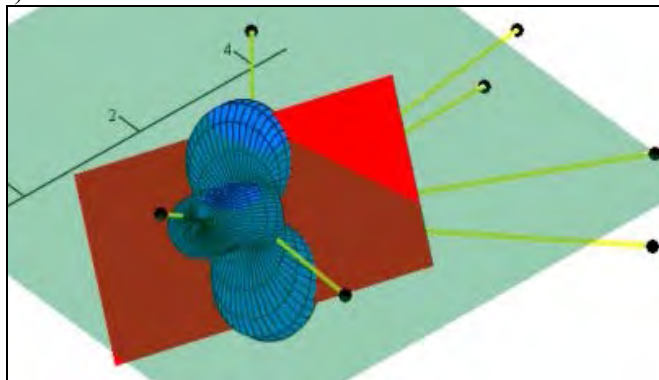
g)



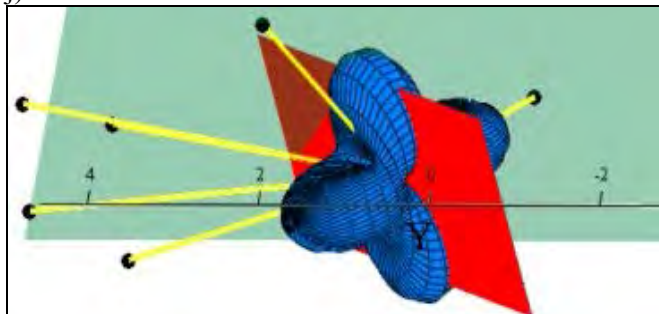
h)



i)



j)



Rys. 6.12a-j. Trójwymiarowe obrazy współczynnika radiacji amplitud RP w polu dalekim dla fali poprzecznej S dla wstrząsu o energii $2 \cdot 10^8$ J z dnia 9.09.2004 roku o mechanizmie ogniska przedstawionym na rysunku 5.5e: czarne punkty – stanowiska sejsmometryczne, płaszczyzna zielona – powierzchnia ziemi, płaszczyzna czerwona – płaszczyzna poślizgu dla mechanizmu podwójnej pary sił

Podsumowanie

Jednym ze zjawisk fizycznych towarzyszących działalności górniczej zarówno w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym, jak i w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym jest aktywność sejsmiczna. Problemem dominującym związanym z sejsmicznością górniczą jest od wielu lat zagrożenie tąpnięciami, mające w pewnych sytuacjach znamiona katastrofy górniczej, tym niemniej zagrożenie powierzchni w postaci drgań wywoływanych wstrząsami górniczymi i oddziałujących na ludzi, obiekty budowlane, infrastrukturę techniczną i różne elementy środowiska naturalnego jest także istotnym problemem technicznym i społecznym. Drgania te powodują określone odczucia i reakcje wśród mieszkańców i mogą być dla nich przyczyną dyskomfortu psychicznego i braku akceptacji dla działalności górniczej. Ponadto występowanie konkretnych szkód w obiektach budowlanych. może dodatkowo potęgować brak tej akceptacji.

Ocena obciążeń dynamicznych w obiektach budowlanych, spowodowanych wstrząsami górniczymi, jest ściśle związana z określeniem poziomu przyspieszeń drgań gruntu w ich bezpośrednim otoczeniu. Stosowana metodyka oceny poziomu drgań polega bądź na bezpośredniej rejestracji przy użyciu specjalistycznej aparatury pomiarowej lub na zastosowaniu empirycznych zależności łączących parametry standardowo określone dla każdego zjawiska sejsmicznego (np. jego energię sejsmiczną) z wielkością przyspieszenia lub prędkością drgań w analizowanym punkcie powierzchni. Zaobserwowano jednak, że zależności te nie charakteryzują się wysokimi współczynnikami korelacji, co świadczy iż występują jeszcze inne, dodatkowe czynniki kształtujące zmienność rozkładu parametru przyspieszenia drgań na powierzchni. Część tej zmienności można łączyć z lokalnym wzmacnianiem drgań przez przypowierzchniową warstwę podłoża gruntowego, tzw. amplifikacją drgań, określoną przez współczynnik amplifikacji. Jednak wiele anomalnych rejestracji sejsmometrycznych trudno wytłumaczyć istnieniem jedynie zjawiska amplifikacji drgań przez nadkład.

Założono więc, że występują jeszcze inne, dodatkowe czynniki mające wpływ na charakter propagacji fal sejsmicznych, a tym samym na rozkład parametru przyspieszenia drgań na powierzchni. Do podstawowych z nich zaliczono:

- mechanizm ogniska wstrząsu, który determinuje kierunkowość radiacji sejsmicznej z ogniska wstrząsu,
- fizyczne parametry ogniska.

W celu rozwiązania postawionej tezy o zależności między powyższymi wielkościami a rozkładem przyspieszenia drgań na powierzchni, zostały zrealizowane badania zaprojektowane w niniejszym projekcie. Oparto je na danych pomiarowych pochodzących z najbardziej reprezentatywnych pod względem sejsmicznym rejonów GZW i LGOM. Badania miały charakter kompleksowy, a podstawowe dane pomiarowe uzyskano technikami: sejsmologiczną, sejsmometryczną i sejsmiczną.

Na podstawie analizy uzyskanych wyników sformułowano następujące wnioski:

1. Uzyskanie porównywalności wyników badań sejsmometrycznych wymaga zawsze redukcji pierwotnych danych z uwzględnieniem współczynnika amplifikacji drgań W_f , który zgodnie z standardami należy wyznaczać stosując technikę sejsmiczną MASW opartą na rejestracji i analizie fal powierzchniowych.
2. Korelacja parametrów fizycznych opisujących ognisko wstrząsu i zachodzące w nim procesy z wypadkową wartością przyspieszenia drgań gruntu wykazuje istotność istniejących zależności (współczynnik korelacji około 0,8), szczególnie od takich parametrów, jak:
 - moment sejsmiczny M_0 ,
 - energia spektralne E_s ,
 - spadek naprężeń $\Delta\sigma$,
 - przesunięcie w ognisku $\overline{D}$.
3. Stwierdzono występowanie wyraźnej zależności między kierunkowością radiacji sejsmicznej ogniska wstrząsu, zależnej od mechanizmu ogniska a rozkładem przyspieszenia drgań na powierzchni, która umożliwia wyjaśnienie występowania wielu anomalii efektu sejsmicznego na powierzchni (występowanie wyraźnie różnych wartości przyspieszenia drgań w punktach położonych w takiej samej odległości epicentralnej, ale o różnych azymutach). Opracowany współczynnik charakteryzujący kierunkowość radiacji $RP/(r/h)$ bardzo dobrze wyraża zmiany ilościowe rozkładu przyspieszenia drgań.
4. Uzyskane wyniki wskazują na nowe możliwości bardziej precyzyjnego prognozowania i oceny rozkładu przyspieszenia drgań na powierzchni w przypadku wstrząsów górniczych. Pozwalają również na lepsze poznanie zjawiska propagacji drgań w niejednorodnym ośrodku skalnym i dla różnych typów mechanizmu ogniska oraz jego parametrów fizycznych.

Literatura

1. Aki K., Richards P.G. (1980): *Quantitative Seismology – Theory and Methods*, Vol. 1, 2. San Francisco, W.H. Freeman and Co.
2. Brune J.N. (1970): *Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from Earthquakes*. Journal of Geoph. Res. Vol. 75 No. 26, s. 4997–5009.
3. Brune J.N. (1971): *Correction*. J. Journal of Geoph. Res. Vol. 76.
4. Domański B. (1997): *Comparison of source parameters of seismic events at polish coal and copper mines*. W: Rockbursts and Seismicity in Mines. Rotterdam, Balkema s. 101–105.
5. Dubiński J., Mutke G. (1997): *Wstrząsy górnicze*. W: Ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych (red. J. Kwiatek). Katowice, Wydaw. GIG, s. 533–581.
6. Dubiński J., Mutke G., Stec K. (1999): *Rozwiązania w sejsmologii górniczej poprawiające efektywność oceny stanu zagrożenia tąpniętami*. Geologia T. 25. Kraków, Wydanie AGH s. 45–58.
7. Dubiński J., Stec K. (2000): *Modalność sejsmiczności górniczej w świetle badań mechanizmu ognisk wstrząsów*. Kraków, Wydaw. Wydział Geologii Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH, s. 331–334.
8. Gibowicz S.J., Domański B., Wiejacz P. (1996): *The focal mechanism and source parameters of seismic events induced by mining*. Acta Montana, ser. A. No. 10 (102), s. 1–18.
9. Gibowicz S.J., Wiejacz P. (1994): *A search for the source non-shearing components of seismic events induced in Polish coal mines*. Acta Geophys. Pol., 42, s. 81–110.
10. Gilbert F. (1970): *Excitation of the normal modes of the earth by earthquake sources*. Geoph. J.R. Astr. Soc. 22, s. 223–226.
11. Haskell N.A. (1964): *Total energy and energy spectral density of elastic wave radiation from propagating faults*. Bull. Seism. Soc. Am., 54, s. 1811–1841.
12. Joyner W.B., Boore D.M. (1981): *Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake*. Bull. Seismol. Soc. Am. 71, s. 2011–2038.
13. Lasek S., Mutke G., Mermion A. (2004): *Wpływ anomalii geologicznych na kształtowanie się zagrożenia sejsmicznego w aspekcie jego wpływu na infrastrukturę powierzchni w rejonie pola panewnickiego kopalni „ŚLĄSK”, wraz z monitoringiem tych zjawisk*. Mat. XI Międzynarodowego Sympozjum GEOTECHNIKA 2004. Gliwice, Politechnika Śląska.
14. Madariaga R. (1976): *Dynamics of an expanding circular fault*. Bull. Seism. Soc. Am., 66, s. 639–666.
15. Mutke G. (1991): *Metoda prognozowania parametrów drgań podłoża generowanych wstrząsami górniczymi w obszarze GZW*. Katowice, GIG (Praca doktorska).
16. Savarienskiy E.F. (1959): *Ocena wpływu warstwy nadkładu na amplitudy drgań na powierzchni*. Izvestia Akad. Nauk SSSR – Seria Geofizyka nr 10, s. 1441–1447.
17. Mutke G. (2004): *Propagacja fal w górotworze LGOM wraz z jego weryfikacją. W: System oceny oddziaływań sejsmicznych na powierzchnię wywołanych przez eksploatację złoża rud miedzi w zakładach górniczych LGOM. Projekt celowy GIG. Katowice (niepublikowana)*.
18. Mutke G., Dworak J. (1992): *Czynniki warunkujące efekt sejsmiczny wstrząsów górniczych na powierzchniowe obiekty budowlane w obszarze GZW*. Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc. M-16 (245), s. 115–129.
19. Park C.B., Xia J., Miller R.D. (1999): *Using MASW to Investigate Subsidence in Tampa Florida Area*. Open-file Raport, s. 99–33.

20. Savage J.C. (1972): *Relation of corner frequency to fault dimension*. J. Geophys. Res. 77, s. 3788–3795.
21. Scholz Ch.H. (1990): *The mechanics of earthquakes and faultings*. Cambridge University Press.
22. Stec K. (2005): *Charakterystyka mechanizmu ognisk wstrząsów górniczych z obszaru Górnośląskiego Zagłębia Węglowego*. Wiadomości Górnicze nr 4, s. 168–174.
23. Stec K., Drzewiecki J. (2000): *Relationship between mine tremor focal mechanism and local mining and geological conditions*. Acta Montana Ser. A, No. 16, s. 189–201.
24. Stec K., Mutke G., Bromek T. i inni (2001): *Geologiczne przyczyny wzmacniania drgań w nadkładzie serii węglowej na obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego*. Katowice, Główny Instytut Górnictwa.
25. Wiejacz P. (1994): *The SMT software*. PAN (niepublikowana).
26. Wiejacz P. (1995): *Moment tensor for seismic events from Upper Silesian coal mine, Poland*. W: *Mechanics of Jointed and Faulted Rock*. (H-P. Rossmanith, ed.), Rotterdam, Balkema, s. 667–672.
27. Xia J., Miller R.D., Park C.B. (1999): *Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves*. Geophysics Vol. 64, No. 3.

ISBN 83-87610-82-8