



Pomiary amplifikacji drgań od wstrząsów górniczych w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym

Measurements of vibration amplification from mining tremors in the Upper Silesian Coal Basin

Dr hab. inż. Grzegorz Mutke, prof. GIG^{*)}

Treść: Przedstawiono wyniki pomiarów amplifikacji drgań przez nadkład warstw czwartorzędowych wykonanych na trzech wybranych poligonach badawczych w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym, charakteryzujących się wysoką sejsmicznością indukowaną działalnością górniczą. Na każdym z nich rejestrowane były drgania na stanowisku powierzchniowym oraz w otworze 30 m pod ziemią. Taki pomiar pozwalał na bezpośrednią ocenę współczynnika amplifikacji prędkości drgań PGV w domenie czasu, który jest kluczowy do określania drgań powierzchni terenu od zaistniałych i prognozowanych wstrząsów górniczych. Współczynnik ten na poligonach badawczych osiągał dla składowych poziomych prędkości drgań, PGVHmax wartości do 2,4. Ponadto, parametr ten jest wykorzystywany do oceny stopnia intensywności drgań według Górniczej Skali Intensywności Sejsmicznej, GSIS-2017. Przedstawiono również wyliczenia podstawowej częstotliwości rezonansowej dla nadkładu warstw na poszczególnych poligonach pomiarowych oraz obliczono współczynniki amplifikacji na podstawie równań falowych dla dwuwarstwowego modelu ośrodka lepkosprężystego. Wykazano, że wartości współczynnika amplifikacji prędkości drgań w domenie czasu wyznaczone z pomiarów oraz obliczone analitycznie są porównywalne.

Abstract: The results of measurements of vibration amplification by the overburden of Quaternary layers made on three selected testing sites in the Upper Silesian Coal Basin characterized by high seismicity have been presented. At each test site, vibrations were recorded at the surface and in the 30m borehole. Such measurement allows direct assessment of the amplification coefficient of PGV vibration velocity in the time domain. This parameter is used to predict vibrations from existing and forecast mining shocks. On the testing fields an amplification coefficient reached PGVHmax up to 2.4 for horizontal components of vibration velocity. Moreover, using the PGVHmax parameter, the intensity degree is assessed according to the Mining Seismic Intensity Scale, GSIS-2017. Also calculations of the first frequency resonance for the overburden of Quaternary near surface layers on individual measurement site have been presented as well as the amplification coefficients were calculated on the basis of wave equations for a two-layer model of visco-elastic medium. It has been shown that the amplification coefficient of the vibration velocity in the time domain determined from the measurements and calculated analytically are comparable.

Słowa kluczowe:

wstrząs górniczy, intensywność sejsmiczna, amplifikacja drgań, mapy zagrożenia sejsmicznego

Key words:

mining shock, seismic intensity, vibration amplification, seismic hazard maps

1. Wprowadzenie

Sejsmiczność w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym (GZW) indukowana eksploatacją górniczą charakteryzuje się wstrząsami górotworu w zakresie magnitud osiągniętych wartości $M=4.5$ (energia sejsmiczna rzędu $10^{10}J$). W przypadku silnych trzęsień ziemi mogą występować zdecydowanie wyższe wartości magnitud, nawet zbliżone do $M=9$ i są to zjawiska powodujące ogromne zniszczenia na rozległych obszarach. W inżynierii sejsmicznej obliczenia sił dynamicznych i ocenę ich wpływu na obiekty budowlane praktycznie wykonuje się dla trzęsień ziemi od magnitudy przekraczającej wartość progową $M=4$. Zatem, mogłoby się wydawać, że nie powinien występować problem powstawania szkód obiektów budowlanych wywołanych przez sejsmiczność górniczą w GZW. Tak jednak nie jest, ponieważ bezpośrednią miarą oddziaływań sejsmicznych na obiekty budowlane jest intensywność sejsmiczna, a nie magnituda czy też energia sejsmiczna wstrząsu. Magnituda

i energia sejsmiczna wstrząsu są bowiem parametrami charakteryzującymi ognisko trzęsienia ziemi lub wstrząsu górotworu. Do ich obliczenia należy uwzględnić cały proces transmisji i tłumienia drgań na drodze od ogniska wstrząsu do miejsca ich rejestracji. W ten sposób uzyskuje się informację o wielkości energii sejsmicznej wstrząsu w jego ognisku (Dubiński, Wierzchowska 1973). Natomiast intensywność sejsmiczna charakteryzuje wielkość drgań w określonym miejscu na powierzchni ziemi powiązaną z ich skutkami. Skutki te można opisać werbalnie jako uszkodzenia zaobserwowane w obiektach budowlanych, w środowisku oraz przez odczuwalność drgań przez ludzi, które odpowiadają poszczególnym stopniom intensywności sejsmicznej. Taką skalą makrosejsmiczną jest stosowana w Europie skala EMS-98 (*European Macroseismic Scale*), opisująca skutki drgań w 12 stopniach intensywności. Skala ta, w 1998 r. zastąpiła popularną w polskim przemyśle górniczym skalę MSK-64. Drugi rodzaj skal kwantyfikuje stopień intensywności na podstawie parametrów pomiarowych drgań (Wald i in., 1999b). W obszarze GZW tego typu skalą jest Górnicza Skala Intensywności Sejsmicznej GSIS-2017, w której stopnie intensywności opisujące skutki w zabudowie

^{*)} Główny Instytut Górnictwa, Katowice

powierzchniowej określane są na podstawie takich parametrów drgań jak szczytowa amplituda poziomych składowych prędkości drgań oraz czas trwania drgań (Mutke i in. 2018). Należy podkreślić, że intensywność drgań sejsmicznych zależy od wielu czynników, z których najistotniejszymi są:

- energia sejsmiczna (magnituda),
- tłumienie drgań z odległością od źródła,
- **amplifikacja drgań**,
- kierunkowość propagacji drgań.

W takim ujęciu parametru intensywności drgań należy się zastanowić, dlaczego wstrząsy górnicze o wartości magnitudy $M=4$ mogą powodować, często znaczące, uszkodzenia obiektów budowlanych, a trzęsienia ziemi o takiej samej magnitudzie są raczej nieszkodliwe. Biorąc pod uwagę ww. czynniki, jedyną istotną różnicą może być związana z głębokością ognisk trzęsień ziemi i wstrząsów górniczych. Ogniska płytkich trzęsień ziemi znajdują się na głębokości kilku kilometrów i więcej, natomiast ogniska najsilniejszych wstrząsów górotworu pochodzenia górniczego to 1-2 km. Wynika stąd, że w drodze do powierzchni, fala sejsmiczna wywołana przez trzęsienie ziemi musi być mocniej wytłumiona ze względu na dłuższą drogę propagacji i tym samym w strefie epicentralnej na powierzchni zarejestrowane zostaną słabsze amplitudy drgań niż dla wstrząsu górniczego o tej samej magnitudzie.

Fizykę tego zjawiska wyraża funkcja tłumienia, określająca efekty geometrycznego rozprzestrzeniania oraz pochłaniania fal z odległością (Gutenberg, Richter 1956, Kanamori i in. 1993)

$$A(r) = Ar^{-n} \exp(-ar) \quad (1)$$

gdzie:

- n – współczynnik geometrycznego rozprzestrzeniania się fali,
- α – pochłanianie,
- $r = \sqrt{r_e^2 + h^2}$, r – odległość hipocentralna (przy czym h jest głębokością ogniska trzęsienia ziemi/ wstrząsu górniczego, a r_e jest odległością epicentralną),
- A – amplituda fali w ognisku wstrząsu,
- $A(r)$ – amplituda w odległości r od ogniska wstrząsu.

Współczynniki geometrycznego tłumienia i pochłaniania dla obszaru GZW zostały wyznaczone przez Dubińskiego i Wierzchowską (1973) i wynoszą: dla fali podłużnej: $n_p = 1,083$ $\alpha_p = 1,89 \cdot 10^{-5}$, a dla fali poprzecznej: $n_s = 1,067$ $\alpha_s = 1,65 \cdot 10^{-5}$. Oznacza to, że współczynnik geometrycznego tłumienia jest zbliżony do $1/r$, a więc dla głębokości ogniska 1 km praktycznie amplituda rejestrowana na powierzchni będzie podobna, natomiast dla trzęsienia ziemi o głębokości ogniska 5 km, amplituda drgań przy powierzchni będzie około 5-krotnie mniejsza. W efekcie w strefie epicentralnej najsilniejszych wstrząsów górniczych rejestruje się bardzo wysokie amplitudy prędkości drgań, PGV, rzędu 0.100 m/s oraz amplitudy przyspieszenia drgań, PGA, rzędu 2.8 m/s² w paśmie częstotliwości drgań do 10Hz (Dubiński i in. 2020). Dalej, gdyby nawet założyć, że fale rozchodzą się w ośrodku jednorodnym, to rejestracje amplitud drgań na powierzchni w jednakowych odległościach nie będą takie same w różnych kierunkach, a izolnie jednakowych amplitud prędkości lub przyspieszenia drgań na powierzchni nie tworzą idealnego koła wokół epicentrum wstrząsu. Fakt ten wynika z mechanizmu ognisk silnych wstrząsów górniczych wywoływanych procesami ścinania skał i w efekcie kierunkowej emisji pola falowego. Dla wstrząsów górniczych radiacja sejsmiczna była opisywana w publikacjach (Lurka i in. 2003, Dubiński i in. 2006). Uwzględnienie radiacji sejsmicznej w sporządzanych

mapach sejsmicznych po zaistnieniu silnego wstrząsu jest zadaniem skomplikowanym. Obliczenia dla modelowania pola falowego z uwzględnieniem mechanizmu wstrząsu wyrażonego w formie tensora momentu sejsmicznego, który opisuje układ sił w źródle sejsmicznym wykonał Chodacki (2019, 2020). Inną metodą jest wykorzystanie bezpośrednich rejestracji drgań na stanowiskach powierzchniowych (o ile stacje te są wystarczająco liczne i rozmieszczone w różnych azymutach w obszarze górniczym kopalni) do obliczeń z wzorów empirycznych, tzw. funkcji tłumienia (Mutke i in. 2017).

Finalnym czynnikiem, który wpływa na efekt sejsmiczny drgań powierzchni, a tym samym na intensywności drgań, jest amplifikacja (czyli wzmocnienie) amplitudy drgań przez warstwy nadkładu. Problem amplifikacji drgań w przypadku trzęsień ziemi był analizowany od bardzo dawna, np. Sawarienskiej (1959). Jednak literatury poświęconej temu problemowi dla wstrząsów pochodzenia antropogenicznego jest zdecydowanie mniej. Pierwsze prace badawcze w tym zakresie były prowadzone w GZW w latach 80. ubiegłego wieku i na początku lat 90. (Mutke i in. 1988, Mutke 1991). Należy podkreślić, że amplifikacja drgań w GZW wpływa w bardzo istotny sposób na wielkość amplitudy drgań na powierzchni, a tym samym na skutki tych drgań kwantyfikowane przez stopnie intensywności sejsmicznej według Górniczej Skali Intensywności Sejsmicznej, GSIS-2017 (Mutke i in. 2018).

2. Zjawisko amplifikacji drgań powierzchni

W zależności od swojej charakterystyki sejsmogeologicznej nadkład warstw przypowierzchniowych w różny sposób wpływa na zmianę amplitudy drgań, a także podstawowej częstotliwości i czasu trwania drgań (Lomnitz, Rosenblueth 1976). Liczne pomiary empiryczne wykonywane dla trzęsień ziemi i wstrząsów indukowanych eksploatacją górniczą wskazują, że nadkład zbudowany ze słabych gruntów (niska prędkość propagacji fali poprzecznej $S < 800$ m/s) wzmacnia amplitudy drgań, obniża ich podstawową częstotliwość oraz zwiększa czas trwania drgań. Te zmiany to istota zjawiska amplifikacji. Z kolei twarde skalne podłoże nie wzmacnia amplitudy drgań, preferuje ich wyższe częstotliwości i krótszy czas trwania drgań. Oszacowanie amplifikacji drgań w odniesieniu do różnych warunków budowy warstw nadkładu jest nazywane mikrozonizacją (ang. *microzonning*) i stanowi istotny element przy opracowywaniu map zagrożenia sejsmicznego (ang. *seismic hazard maps*) (Wald i in. 1999, Mutke 2019).

Dla wstrząsów górniczych występujących w obszarze GZW mapy zagrożenia sejsmicznego obliczane są najczęściej przez przemnożenie poziomych amplitud prędkości drgań wyznaczonych dla „twardego” skalnego podłoża przez wartość współczynnika amplifikacji drgań (Mutke 1991, 2019):

$$PGV_{Hmax} = PGV_{Hrock} \cdot W_{amp} \quad (2)$$

gdzie:

- PGV_{Hmax} – szczytowe amplitudy prędkości drgań,
- W_{amp} – współczynnik amplifikacji drgań w badanym miejscu,
- PGV_{Hrock} – szczytowe amplitudy drgań na „twardym” podłożu.

Mapa amplifikacji drgań liczona dla najsilniejszych wstrząsów górniczych dla obszaru GZW wskazuje, że w domenie czasu współczynnik W_{amp} zmienia się od 1 do 5 (Dubiński i in. 2020).

Do opracowania map zagrożenia sejsmicznego amplifikacja powinna być wyznaczana dla warstw nadkładu położonych nad twardym podłożem, definiowanym przez prędkość propagacji fali poprzecznej większą od 800 m/s. Dla obszaru GZW

są to najczęściej warstwy czwartorzędowe. Amplifikacji drgań poddawane są zarówno fale bezpośrednie (P i S), jak i fale powierzchniowe. Spośród tych fal najistotniejszą rolę w GZW, z punktu widzenia amplifikacji drgań oraz z punktu widzenia oceny skutków drgań odgrywają fale poprzeczne poziome SH. Z fizycznego punktu widzenia amplifikacja fal SH w ośrodku warstwowym polega na zjawisku wielokrotnego odbicia i nakładania się fal padających i odbitych (Sawarienski 1959, Okamoto 1984). W zależności od lokalnej budowy geologicznej warstw nadkładu, obserwator znajdujący się dalej od epicentrum wstrząsu może być poddany większym drganiom niż obserwator znajdujący się w epicentrum wstrząsu.

Współczynnik amplifikacji drgań można określać zarówno na podstawie pomiarów, jak i teoretycznie, przy czym w obu przypadkach wykorzystuje się kilka technik pomiarowych i obliczeniowych, Poniżej przedstawiono kilka z nich.

Wykonanie testowych pomiarów sejsmometrycznych i określanie współczynnika amplifikacji drgań na podstavie:

- porównania drgań pomierzonych na stanowisku posadowionym na gruncie z drganiami ze stanowiska referencyjnego umieszczonego na twardej skale, które znajdują się blisko siebie, a drgania są zarejestrowane w tym samym kierunku (np. Mutke, Dworak 1992),
- porównania drgań zarejestrowanych równocześnie na profilu pionowym i na skalnym podłożu pod warstwą nadkładu oraz na powierzchni (np. Okamoto 1984, Olszewska, Mutke 2018, Mutke 2019),
- badania stosunku spektralnego H/V (drgań w kierunku poziomym do drgań pionowych) z jednej stacji sejsmometrycznej i określanie uprzywilejowanego okresu drgań własnych nadkładu w miejscu pomiaru oraz współczynnika amplifikacji drgań (Nakamura 1989).

Obliczanie i modelowanie drgań na podstawie analitycznego rozwiązania równania ruchu falowego dla określonych warunków brzegowych (np. Sawarienski 1959, Okamoto 1984, Mutke, Dworak 1992).

Przy analitycznym modelowaniu drgań niezbędne okazuje się wykonanie profilowań sejsmicznych, w celu wyznaczenia prędkości propagacji fali poprzecznej w nadkładzie. W obliczeniach wykorzystuje się rozwiązanie dla wielowarstwowego ośrodka opisanego modelem lepko-sprężystym (Lomnitz, Rosenblueth 1976, Marcak, Zuberek 1994). W praktyce często taki układ warstw w obliczeniach amplifikacji drgań jest najczęściej upraszczany do modelu dwuwarstwowego, w którym nadkład stanowi jedną warstwę o sumarycznej miąższości H, składającą się z kilku cieńszych.

Z rozwiązań teoretycznych wynika, że wpływ na zmianę amplitudy drgań (amplifikację) mają następujące czynniki:

- długość fali padającej l (lub jej prędkość kątowna $w = 2\pi f$),
- miąższość warstwy H,
- gęstość warstwy ρ ,
- prędkość fali poprzecznej w warstwie nadkładu β ,
- typ fali (SH, V),
- kąt padania fali e.

Do bardzo ważnych wniosków odnoszących się do amplifikacji drgań i przydatnych w codziennej praktyce inżynierskiej należy zaliczyć następujące:

- Amplitudy drgań padających na swobodną powierzchnię ziemi ulegają podwojeniu; na powierzchniowym stanowisku sejsmometrycznym rejestruje się więc dwa razy większe amplitudy niż dochodzące do granicy gruntu z powietrzem.
- Dla fali sejsmicznej o okresie drgań $T = 4H/b$ amplifikacja będzie największa.

Przekształcając powyższą zależność otrzymuje się (Sawarienski 1959):

$$f_{rez1} = \frac{\beta}{4H} \quad (3)$$

gdzie: f_{rez1} jest podstawową częstotliwością pierwszego rezonansu drgań warstwy nadkładu, dla której amplifikacja drgań będzie największa.

Badania dowodzą (Kokusho 2017), że z zadawalającą dokładnością ośrodek wielowarstwowo można zastąpić modelem dwuwarstwowym. Formuła $\frac{1}{4}$ długości fali będzie w dalszym ciągu obowiązywała dla takich warunków, przy modyfikacji zapisu zależności (3). Wówczas otrzymuje się aproksymację rozwiązania dokładnego:

$$f_{rez1} = \frac{\beta_{sr}}{4H} \quad (4)$$

gdzie:

$$\beta_{sr} = \frac{H}{\sum_i H_i / \beta_i},$$

H_i – miąższość i-tej warstwy w ośrodku wielowarstwowym,

β_i – prędkości fali poprzecznej w i-tej warstwie.

Dla silnych wstrząsów górniczych, które są najbardziej szkodliwe dla obiektów budowlanych, dominującymi częstotliwościami drgań o maksymalnych amplitudach, w obszarze GZW są częstotliwości rzędu 2-10 Hz. Dla takiego zakresu częstotliwości, znaczącą amplifikację powodują utwory czwartorzędowe o miąższości od kilkunastu do około 40 metrów, zalegające na strukturach skał karbonskich lub triasowych. Wynika to z pierwszej częstotliwości rezonansu warstw nadkładu, zależność (3). Dla czwartorzędowych warstw nadkładu w GZW charakterystyczne są bowiem prędkości propagacji poprzecznej fali sejsmicznej rzędu 250-500 m/s (grunty klasy B i C według Eurokod 8 - 1998).

Przykładem ogólnodostępnego programu komputerowego służącego do obliczania amplifikacji drgań dla modelu wielowarstwowego jest program SHAKE. Do obliczeń analitycznych współczynnika amplifikacji drgań sejsmicznych przedstawionych w tym artykule zastosowano algorytm dla lepko-sprężystego ośrodka dwuwarstwowego. Do tego algorytmu w 1991r. został w GIG opracowany program o nazwie WARSTWY-AMP, który pozwala wyznaczać wartość współczynnika amplifikacji drgań w miejscu, dla którego znane są następujące parametry sejsmogeologiczne ośrodka:

- miąższość warstwy,
- prędkość propagacji fali w strefie małych prędkości i w podłożu twardym (najlepiej rozpoznana w terenie za pomocą pomiarów sejsmicznych),
- gęstość ośrodka w strefie małych prędkości i w podłożu skalnym,
- częstotliwość (długość) fali padającej z twardego podłoża na warstwę nadkładu.

Dane geologiczne dotyczące miąższości warstwy o małej prędkości propagacji fal sejsmicznych odczytuje się z map nadkładu czwartorzędowego, bądź bezpośrednio z wyników profilowania sejsmicznego. Gęstość ośrodka oznaczana jest w laboratorium na próbkach rdzeni otworowych lub przypisywana z literatury dla określonej budowy litologicznej nadkładu i podłoża twardego. Częstotliwość drgań określa się na podstawie informacji uzyskanych z pomiarów drgań generowanych przez wstrząsy górnicze zarejestrowane na podłożu skalnym. Dla obszaru Górnego Śląska takie pomiary i zależności empiryczne zostały przedstawione w pracy Mutke (1991).

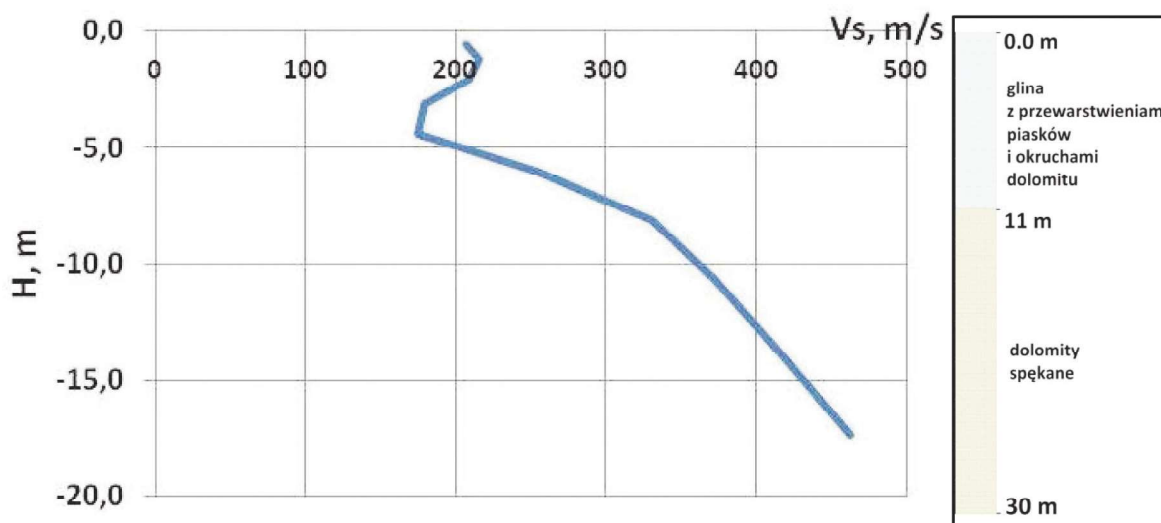
3. Charakterystyka poligonów pomiarowych

W ramach realizacji projektu infrastrukturalnego EPOS PL rozbudowana została między innymi Górnoląska Regionalna Sieć Sejsmologiczna (Mutke i in. 2019). Przedmiotem rozbudowy były nowe stacje sejsmiczne produkcji GeoSIG Ltd. do pomiaru prędkości drgań w zakresie od 0,2 Hz (13 stacji) oraz stacje do inżynierskich badań sejsmometrycznych rejestrujące przyspieszenia drgań (13 stacji), www.grss.gig.eu. W kilku lokalizacjach stacji zainstalowano parami akcelerometry na powierzchni oraz pod ziemią w otworach wiertniczych na głębokości 30 m. Przyspieszeniowe stacje sejsmometryczne przeznaczone są nie tylko do lokalizacji ognisk wstrząsów, ale również do badania amplifikacji drgań w obszarze GZW. W niniejszym artykule przedstawione zostaną rejestracje z trzech takich stacji zlokalizowanych w obszarach o wysokiej sejsmiczności, tj. w dzielnicach: Miechowice w Bytomiu, Panewniki w Katowicach oraz Niewiadom w Rybniku.

Przy każdej z tych trzech stacji pomiarowych wykonano profilowanie sejsmiczne techniką MASW w celu wyznaczenia prędkości propagacji fali poprzecznej „S” w nadkładzie czwartorzędowym. Prędkości propagacji poprzecznych fal sejsmicznych posłużyły do teoretycznych obliczeń wartości częstotliwości rezonansowych nadkładu warstw czwartorzędowych na podstawie zależności (4) oraz współczynnika amplifikacji uśrednionego dla zakresu częstotliwości drgań od 2 do 10 Hz. Uśredniony współczynnik amplifikacji, W_{amp} wyraża przybliżoną wartość amplifikacji drgań dla całego sejsmogramu zarejestrowanego w domenie czasu, czyli wskazuje ile razy wyższą pikową (szczytową) amplitudę drgań zarejestrowano na nadkładzie miękkich warstw czwartorzędowych, w odniesieniu do drgań na skalnym podłożu.

3.1. Poligon w dzielnicy Miechowice w Bytomiu

Stanowisko do sejsmometrycznych pomiarów inżynierskich w Bytomiu zlokalizowane jest w dzielnicy Miechowice, w otworze wiertniczym o współrzędnych geograficznych $B=50,362130$ oraz $L=18,856548$. Z profilu sejsmicznego wynika, że czwartorzęd, występujący na warstwie spękanych dolomitów, stanowi 11-metrowa warstwa zbudowana z glin, z cienkimi przewarstwieniami piasków i okruchami dolomitu (rys. 1). Profil prędkości propagacji poprzecznej fali sejsmicznej „S” charakteryzuje się wartościami od 180 m/s do 450 m/s.



Rys. 1. Profil prędkościowy dla fali poprzecznej „S” oraz profil litologiczny dla stanowiska sejsmometrycznego Miechowice w Bytomiu

Fig. 1. Velocity profile for transverse „S” wave and lithological profile for seismic station Miechowice in Bytom

Obliczona średnia prędkość propagacji fali „S” w nadkładzie o grubości 30 m wynosi $V_{s30}=352$ m/s i klasyfikuje ten nadkład do klasy gruntów C według normy Eurokod 8 - 1998, czyli podatnych na wzmacnianie drgań. Średnia prędkość fali poprzecznej „S” obliczona dla 11-metrowego nadkładu czwartorzędowego, wynosi $\beta=252$ m/s.

Z obliczeń wykonanych według zależności (4) wynika, że rezonans dla 11-metrowej warstwy nadkładu czwartorzędowego wynosi na tym stanowisku $f_1=5,7$ Hz. Z kolei amplifikacja drgań wyliczona dla tego nadkładu w paśmie częstotliwości od 2 do 10 Hz wynosi $W_{amp}=2.25$.

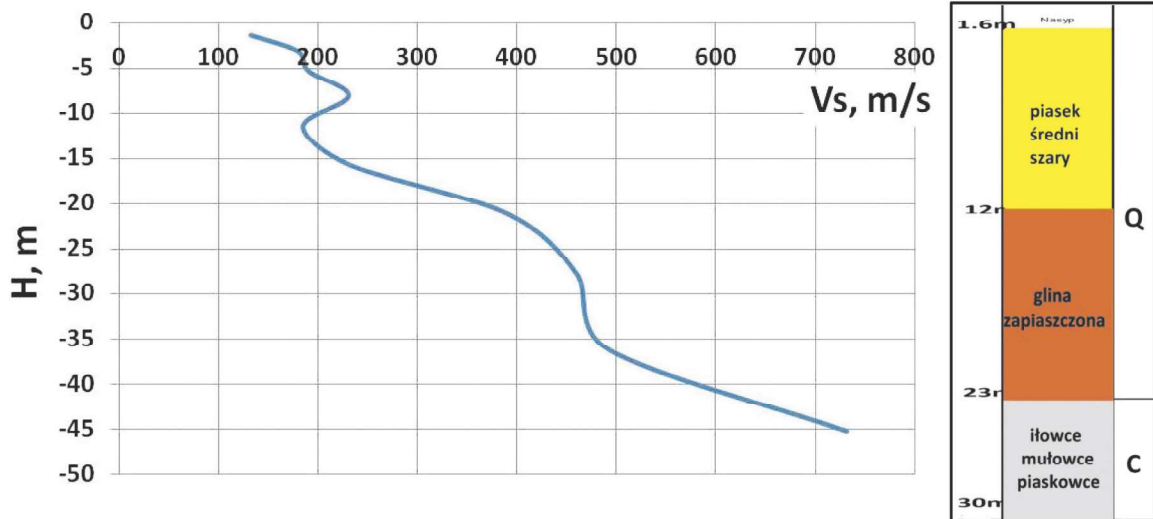
3.2. Poligon w dzielnicy Niewiadom w Rybniku

Stanowisko sejsmometryczne do pomiarów inżynierskich w Rybniku zlokalizowane jest w dzielnicy Niewiadom przy stadionie miejskim MOSiR, w otworze wiertniczym o współrzędnych geograficznych $B=50,070200$ oraz $L=18,465833$. Z profilu sejsmicznego wynika, że czwartorzęd stanowi 23-metrowa warstwa zbudowana z piasku średniego szarego oraz z gliny zapiaszczonej i jest on położony na karbońskich iłowcach i mułowcach (rys. 2). Profil prędkości propagacji poprzecznej fali sejsmicznej „S” charakteryzuje się wartościami od 150 m/s do 730 m/s. Obliczona średnia prędkość fali „S” w nadkładzie 30 m wynosi $V_{s30}=255$ m/s i klasyfikuje ten nadkład do klasy gruntów C według normy Eurokod 8 - 1998. Średnia prędkość fali poprzecznej „S” obliczona dla 23 m nadkładu czwartorzędowego, wynosi $\beta_Q=251$ m/s.

Rezonans drgań wyliczony dla 23-metrowej warstwy nadkładu czwartorzędowego wynosi na tym stanowisku $f_1=2,7$ Hz. Amplifikacja drgań wyliczona dla tego nadkładu w paśmie częstotliwości od 2 do 10 Hz osiąga wartość $W_{amp}=1.9$.

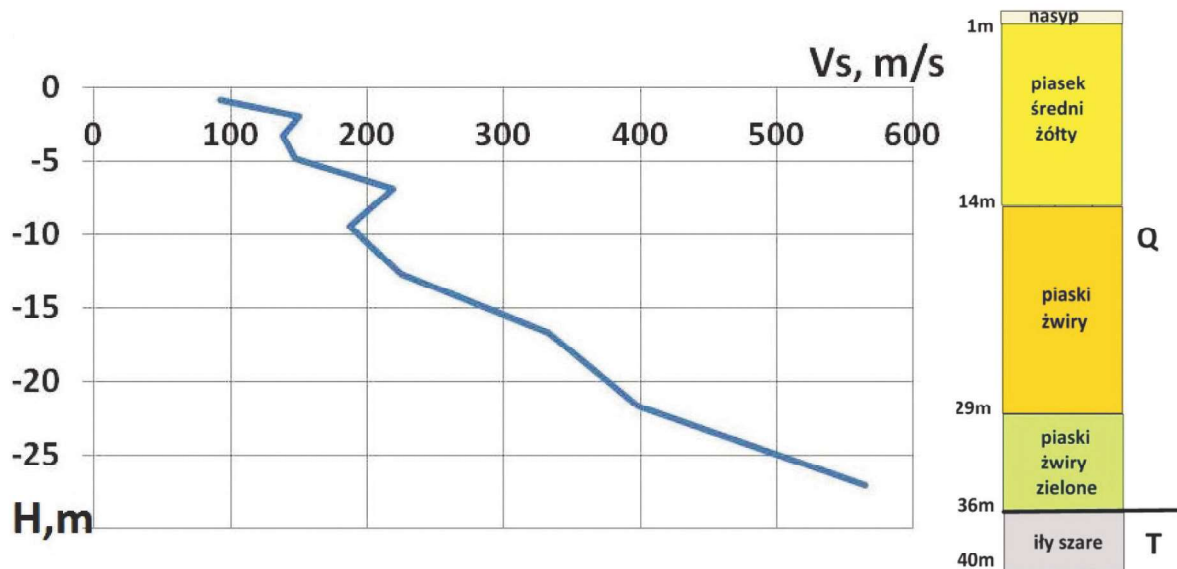
3.3. Poligon w dzielnicy Panewniki w Katowicach

Stanowisko sejsmometryczne do pomiarów inżynierskich w Katowicach-Panewnikach zlokalizowane jest na terenie oczyszczalni ścieków, w otworze wiertniczym o współrzędnych geograficznych $B=50,230617$ oraz $L=18,925600$. Z profilu geologicznego wynika, że czwartorzęd stanowi 36-metrowa warstwa zbudowana z piasków średnioziarnistych żółtych, żwirów oraz żwirów zielonych i jest on położony



Rys. 2. Profil prędkościowy dla fali poprzecznej „S” oraz profil litologiczny dla stanowiska sejsmometrycznego Niewiadom w Rybniku

Fig. 2. Velocity profile for transverse „S” wave and lithological profile for seismic station Niewiadom in Rybnik



Rys. 3. Profil prędkościowy dla fali poprzecznej „S” oraz profil litologiczny dla stanowiska sejsmometrycznego Panewniki w Katowicach

Fig. 3. Velocity profile for transverse „S” wave and lithological profile for seismic station Panewniki in Katowice

na trzeciorzędowych iłach piaszczystych szarych (rys. 3). Profil prędkości propagacji poprzecznej fali sejsmicznej „S” charakteryzuje się wartościami od 90 m/s do 560 m/s dla nadkładu czwartorzędowego. Obliczona średnia prędkość fali poprzecznej „S” w nadkładzie 30 m wynosi $V_{s30} = 434$ m/s i klasyfikuje ten nadkład do klasy gruntów B według normy Eurokod 8 - 1998. Średnia prędkość fali poprzecznej «S» obliczona dla 36 m nadkładu piasków czwartorzędowych, wynosi $\beta = 460$ m/s.

Rezonans drgań wyliczony dla 36-metrowej warstwy nadkładu czwartorzędowego wynosi na stanowisku w Panewnikach $f_r = 3,2$ Hz. Amplifikacja drgań wyliczona dla tego nadkładu w paśmie częstotliwości od 2 do 10 Hz osiąga wartość $W_{amp} = 1,6$.

4. Wyniki pomiarów i dyskusja

W rozdziale tym przedstawiono kilka przykładowych rejestracji na poligonach badawczych opisanych w rozdziale 3. Dla każdego pomiaru przedstawiono sejsmogramy prędkościowe wyliczone po całkowaniu sygnałów przyspieszeniowych. Ponadto, wyznaczono wartości współczynnika amplifikacji drgań dla czasowego poziomego przebiegu prędkościowego PGV_H . Wartość pikowych drgań poziomych jest podstawowym parametrem do wyznaczania stopni intensywności sejsmicznej według skali GSIS-2017 i oceny szkodliwości drgań w obszarze GZW.

4.1. Poligon pomiarowy w dzielnicy Miechowice w Bytomiu

Przykładowe sejsmogramy z poligonu Bytom-Miechowice przedstawiono dla wstrząsu z dnia 23.04.2018 o energii sejsmicznej $E=2 \cdot 10^9$ J. Maksymalna amplituda prędkości drgań na powierzchni osiągnęła dla składowej poziomej EW wartość $PGV_{EWG}=0.0187$ m/s, natomiast na stanowisku zainstalowanym 30 m pod powierzchnią wartość $PGV_{EWD}=0.0053$ m/s (rys.4).

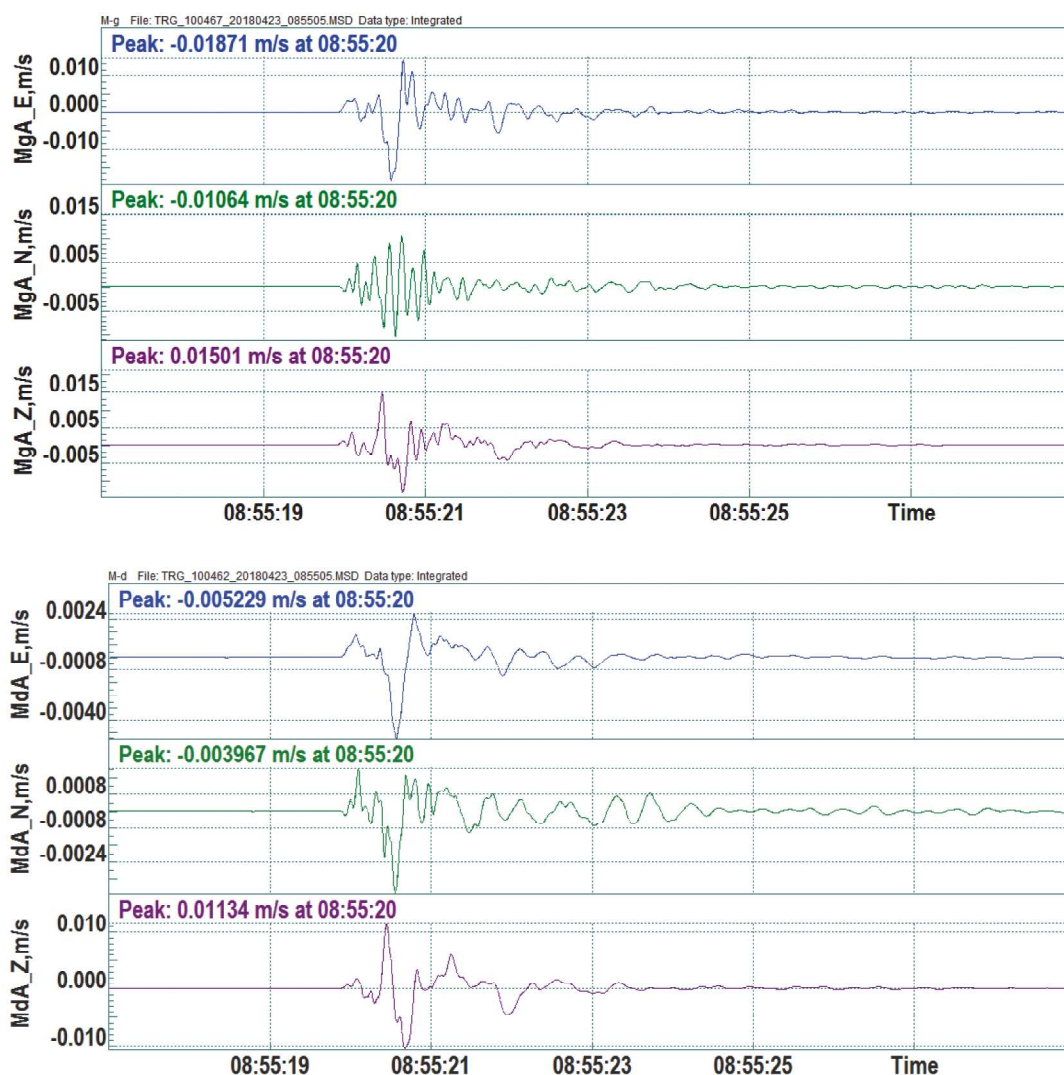
Amplifikacja została wyznaczona z rejestracji prędkościowych przez podzielenie pikowych amplitud na stanowisku powierzchniowym przez pikowe amplitudy na stanowisku podziemnym. Trzeba pamiętać, że na granicy ośrodków, tj. ziemi i powietrza, następuje dwukrotne wzmocnienie amplitud drgań na składowych poziomych, natomiast składowa pionowa generalnie nie ulega wzmocnieniu (Olszewska, Mutke 2018). Dla poszczególnych składowych poziomych amplifikacja wynosi: $W_{EW}=1,8$ oraz $W_{NS}=1,3$. Natomiast najbardziej istotna z punktu widzenia oceny intensywności drgań jest

amplifikacja wypadkowa składowych poziomych i wynosi ona $W_{amp}=2,2$. Amplifikacja drgań wyliczona dla tego nadkładu w paśmie częstotliwości od 2 do 10 Hz wyniosła $W_{amp}=2,25$.

Wyniki obliczeń analitycznych i bezpośrednich pomiarów amplifikacji drgań na stacji sejsmicznej Miechowice w Bytomiu wskazują, że obie metody dają zbliżone wyniki, o ile dysponuje się odpowiednimi danymi wejściowymi do obliczeń analitycznych i odpowiednimi pomiarami bezpośrednimi.

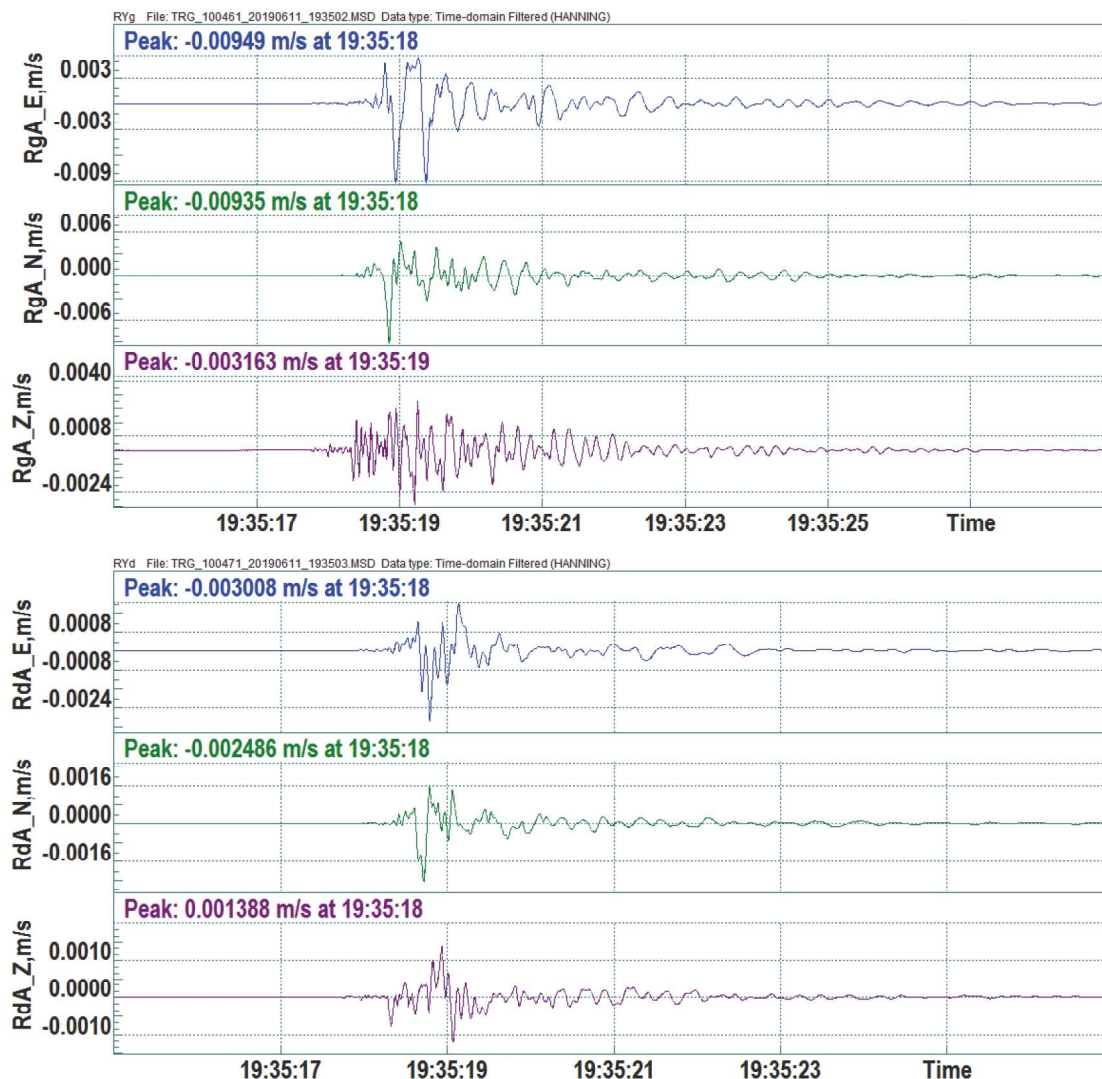
4.2. Poligon pomiarowy w dzielnicy Niewiadom w Rybniku

Przykładowe sejsmogramy z poligonu Niewiadom w Rybniku przedstawiono dla wstrząsu z dnia 11.06.2019 o energii sejsmicznej $E=7 \cdot 10^6$ J. Maksymalna amplituda prędkości drgań na powierzchni została osiągnięta na składowej poziomej EW i wynosi $PGV_{EWG}=0.0095$ m/s, natomiast na stanowisku zainstalowanym 30 m pod powierzchnią, $PGV_{EWD}=0.003$ m/s (rys. 5).



Rys. 4. Sejsmogramy drgań zarejestrowane od wstrząsu z dnia 23.04.2018 r. o energii sejsmicznej $E=2 \cdot 10^9$ J na stanowisku Miechowice na powierzchni (górn) oraz 30 m pod powierzchnią (dół)

Fig. 4. Seismograms recorded for the mining tremor of April 23, 2018 with seismic energy $E=2 \cdot 10^9$ J at the seismic station Miechowice - on the surface (top) and 30 m deeper in borehole (bottom)



Rys. 5. Sejsmogramy drgań zarejestrowane od wstrząsu z dnia 11.06.2019 r. o energii sejsmicznej $E=7 \cdot 10^6$ J na stanowisku Niewiadom na powierzchni (góra) oraz 30 m pod powierzchnią (dół)

Fig. 5. Seismograms recorded for the mining tremor of June 11, 2019 with seismic energy of $E=7 \cdot 10^6$ J at the seismic station Niewiadom - on the surface (top) and 30 m deeper in borehole (bottom)

Dla poszczególnych składowych poziomych amplifikacja wynosi: $W_{EW}=1,6$ oraz $W_{NS}=1,9$. Natomiast najbardziej istotna z punktu widzenia oceny intensywności drgań jest amplifikacja wypadkowa składowych poziomych i wynosi ona $W_{amp}=2,4$. Amplifikacja drgań wyliczona dla tego nadkładu w paśmie częstotliwości od 2 do 10 Hz wyniosła $W_{amp}=1,9$.

Wyniki obliczeń analitycznych i pomiarów bezpośrednich amplifikacji drgań na stacji sejsmicznej Niewiadom w Rybniku wskazują, że amplifikacja obliczona teoretycznie jest nieco niższa. Mogło to wynikać z bardzo znaczącego zawężenia zakresu częstotliwości dominujących w sejsmogramie.

4.3. Poligon pomiarowy w dzielnicy Panewniki w Katowicach

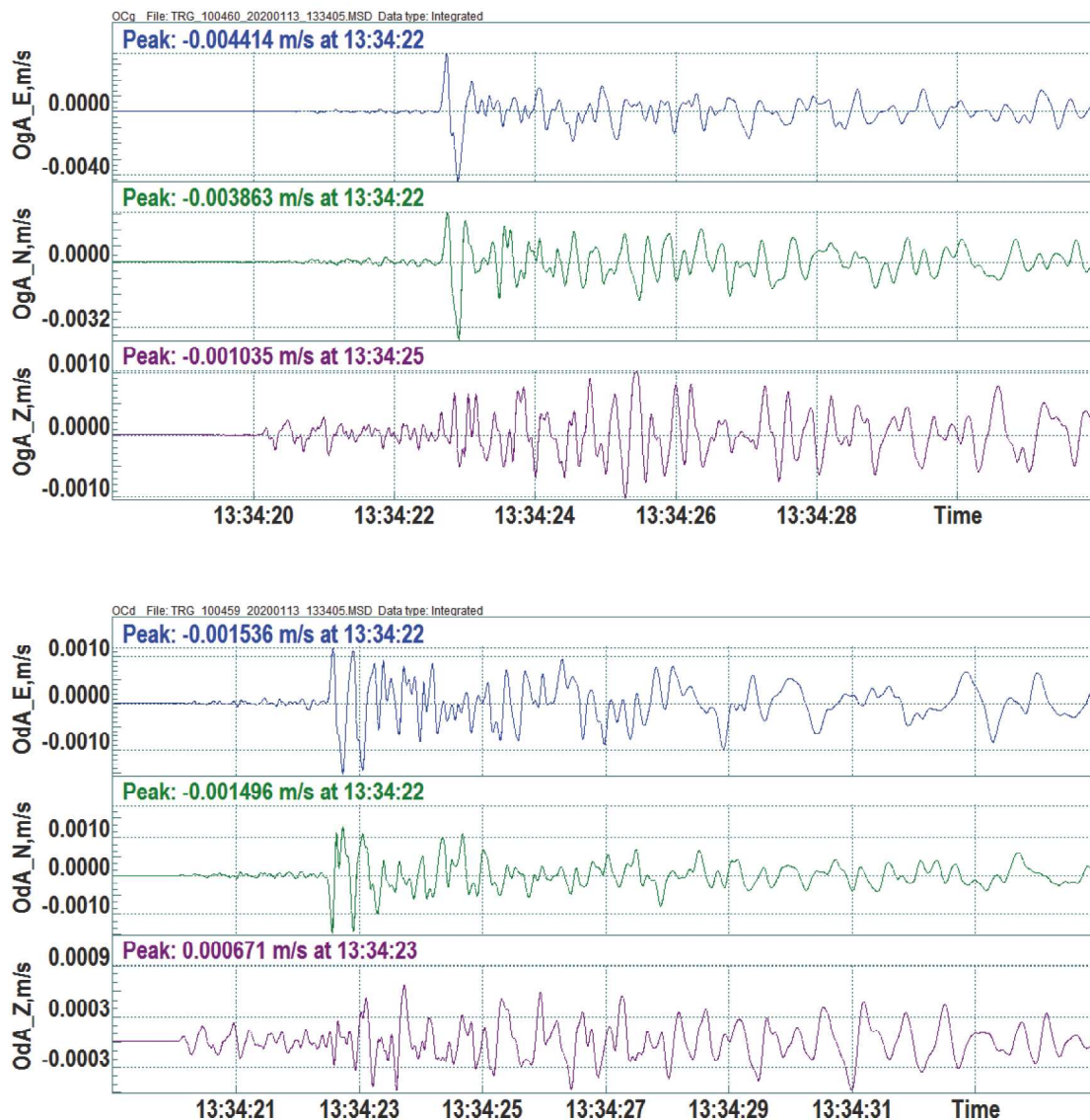
Przykładowe sejsmogramy z poligonu Panewniki w Katowicach przedstawiono dla wstrząsu z dnia 13.01.2020 o energii sejsmicznej $E=3 \cdot 10^9$ J z obszaru kopalni Budryk. Maksymalna amplituda prędkości drgań na powierzchni osiągnęła na składowej poziomej EW wartość $PGV_{EWG}=0,0044$ m/s, natomiast na stanowisku zainstalowanym 30 m pod powierzchnią wartość $PGV_{EWD}=0,0015$ m/s (rys. 6.).

Dla poszczególnych składowych poziomych amplifikacja wynosi: $W_{EW}=1,5$ oraz $W_{NS}=1,3$. Natomiast najbardziej istotna z punktu widzenia oceny intensywności drgań jest amplifikacja wypadkowa składowych poziomych i wynosi ona $W_{amp}=1,9$. Amplifikacja drgań wyliczona dla tego nadkładu w paśmie częstotliwości od 2 do 10 Hz wyniosła $W_{amp}=1,6$.

Wyniki obliczeń analitycznych i pomiarów bezpośrednich amplifikacji drgań na stacji sejsmicznej Panewniki w Katowicach wskazują, że amplifikacja obliczona teoretycznie jest nieco niższa.

5. Wnioski

1. Górnośląska Regionalna Sieć Sejsmologiczna poprzez rozbudowę w ramach projektu infrastrukturalnego EPOS o trzy nowe stacje akcelerometryczne do pomiarów wstrząsów górotworu umożliwia równoczesny pomiar drgań pod ziemią w 30-metrowych otworach wiertniczych oraz na powierzchni. Pozwala to na bardziej szczegółowe badanie amplifikacji drgań przez nadkład przypowierzchniowych warstw geologicznych.



Rys. 6. Sejsmogramy drgań zarejestrowane od wstrząsu z dnia 13.01.2020 r. o energii sejsmicznej $E=3 \cdot 10^9$ J na stanowisku Panewniki na powierzchni (góra) oraz 30 m pod powierzchnią (dół)

Fig. 6. Seismograms recorded for the mining tremor of January 13, 2020 with seismic energy of $E=3 \cdot 10^9$ J at the seismic station Panewniki - on the surface (top) and 30 m deeper in borehole (bottom)

- Przeprowadzone badania sejsmometryczne w GZW wykazały, że w amplifikacja drgań od wstrząsów górniczych charakteryzujących się podstawowym zakresem częstotliwości od 2 do 10 Hz, powodowana jest głównie przez nadkład warstw czwartorzędowych charakteryzujący się małymi prędkościami propagacji poprzecznych fal sejsmicznych.
- Pomiary amplifikacji drgań na stacjach sejsmometrycznych: Panewniki w Katowicach, Miechowice w Bytomiu oraz Niewiadom w Rybniku, zlokalizowanych w rejonach o wysokiej sejsmiczności, które charakteryzują się podłożem geotechnicznym klasy B i C według normy Eurokod 8 - 1998 wskazują, że wartości współczynników amplifikacji dla pikowych amplitud prędkości poziomych składowych drgań, określone dla całego przebiegu czasowego na sejsmogramie dołowym i powierzchniowym, wynosiły na tych stacjach od 1,9 do 2,4.
- Uśrednione wartości współczynników amplifikacji obliczonych dla powyższych trzech lokalizacji w oparciu o rozwiązania analityczne, z zastosowaniem dwuwarstwowego modelu lepko-sprężystego opisującego budowę sejsmogeologiczną warstw przypowierzchniowych, wynosiły dla częstotliwości od 2 do 10 Hz od 1,6 do 2,25 i były zbliżone do rzeczywistych wartości pomiarowych.
- Wykazano, że na podstawie danych sejsmogeologicznych możliwe jest również wyznaczenie pierwszej częstotliwości rezonansowej warstw nadkładu, dla której amplifikacja jest największa.
- Należy podkreślić, że znajomość rozkładu współczynnika amplifikacji drgań na powierzchni ma ogromne znaczenie dla prognozowania w terenie parametru pikowych prędkości poziomych drgań gruntu, PGV_{Hmax} , wywołanych przez wstrząsy górotworu zaistniałe lub prognozowane w obszarach górniczych kopalń. Parametr ten jest wymagany przy sporządzaniu planów ruchu (Rozporządzenie ... 2017) oraz jest jednym z podstawowych dla wyznaczenia stopnia intensywności sejsmicznej według skali GSIS-2017, służącej do oceny szkodliwości drgań na obiekty budowlane.

Publikacja częściowo finansowana z projektu EPOS-PL pn. European Plate Observing System, No POIR.04.02.00-14-A003/16-00, finansowanego w ramach funduszy Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój oraz funduszy European Regional Development Fund (ERDF)

Literatura

- CHODACKI J. 2016 - New Ground Motion Prediction Equation for Peak Ground Velocity and Duration of Ground Motion for Mining Tremors in Upper Silesia, *Acta Geophysica*, vol. 64, no. 6, Dec 2016, pp. 2449-2470.
- CHODACKI J. 2019 - Zastosowanie metody elementów spektralnych do określania drgań gruntu od wstrząsów górniczych. „Przeгляд Górnicy”, No. 75/9, s. 21-27.
- CHODACKI J. 2020 - Simulation of ground motion in a polish coal mine using spectral-element method, *J. Seismol* (2020). <https://doi.org/10.1007/s10950-020-09911-w>.
- DUBIŃSKI J., LURKA A., STEC K. 2006 - Badanie zależności pomiędzy radiacją sejsmiczną a mechanizmem ognisk wstrząsów górotworu na podstawie rejestracji sejsmologicznych i sejsmometrycznych. W: *Warsztaty Górnicze 2006 nt. Zagrożenia naturalne w górnictwie* (s. 65–77). IGSMiE PAN, Kraków.
- DUBIŃSKI J., MUTKE G. 2011- Selected relations between earthquakes and mining seismic events recorded in Polish coal mines. *Proceedings of 22nd World Mining Congress Istanbul-2011*. Editor Dr S. Eskikaya. Volume-I. pp. 350-357.
- DUBIŃSKI J., MUTKE G., CHODACKI J. 2020 - Distribution of Peak Ground Motion caused by mining induced seismicity in the Upper Silesian Coal Basin - Poland. *Archive of Mining Science* (w druku).
- DUBIŃSKI J., WIERZCHOWSKAZ. 1973 - Metody obliczeń energii wstrząsów górotworu na Górnym Śląsku. *Komunikat GIG nr 591*. Główny Instytut Górnictwa, Katowice.
- Eurokod 8** – 1998 - PN-EN: Projektowanie konstrukcji poddanych oddziaływaniom sejsmicznym. Część 1: Reguły ogólne, oddziaływania sejsmiczne i reguły dla budynków.
- GUTENBERG B., RICHTER C.F. 1956 - Magnitude and energy of earthquakes. *Annali di Geofisica*, Vol. 9, No 1, s. 1–6.
- KOKUSHO T. 2017 - *Innovative earthquake soil dynamics*. CRC Press/Balkema.
- LOMNITZ C., ROSENBLUETH E. 1976 - *Seismic and engineering decisions*. Elsevier.
- LURKAA., MUTKE G., DUBIŃSKI J. 2003 - Dokumentacja - Propagacja fal w górotworze LGOM wraz z jego weryfikacją – zadanie 1.1 w projekcie celowym nr 6 T12 0063 2002 C/05870 pt. System oceny oddziaływań sejsmicznych na powierzchnię wywołanych przez eksploatację złoża rud miedzi w zakładach górniczych LGOM (niepublikowana).
- MARCAK, H. I ZUBEREK, W. M., 1994 - *Geofizyka górnicza*. Śląskie Wydaw. Techniczne.
- MUTKE G. (RED.), BARAŃSKI A., CHODACKI J., DUBIŃSKI J., KOWAL T., LURKA A., MUSZYŃSKI L., STEC K. 2018 - *Zasady stosowania Górniczej Skali Intensywności Sejsmicznej GSIS-2017 do prognozy oceny skutków oddziaływania wstrząsów indukowanych eksploatacją na obiekty budowlane oraz klasyfikacji ich odporności dynamicznej*. Instrukcja nr 23 Głównego Instytutu Górnictwa, Katowice.
- MUTKE G. 1991 - *Metoda prognozowania parametrów drgań podłoża generowanych wstrząsami górniczymi w obszarze GZW*, rozprawa doktorska, Główny Instytut Górnictwa, Katowice, s. 140.
- MUTKE G. 2019 - *Oddziaływania górniczych wstrząsów sejsmicznych na powierzchnię*. Wydawnictwo GIG. Monografia, s. 189.
- MUTKE G., DUBIŃSKI J. 2016 - Seismic intensity induced by mining in relations to weak earthquakes. *Proc. of the 24th World Mining Congress. Part. Underground Mining. Rio de Janeiro*, pp.399 - 407.
- MUTKE G., DWORAK J. DUBIŃSKI J. 1988 - Zależność dynamicznych parametrów drgań gruntu związanych z wstrząsami górniczymi od własności przypowierzchniowych utworów geologicznych, *Zeszyty Naukowe Pol. Śląskiej, Górnictwo*, z.172.
- MUTKE G., KOTYRBAA., LURKAA., OLSZEWSKA D., BORKOWSKI A., ARASZKIEWICZ A., BARAŃSKI A. 2019 - Upper Silesian Geophysical Observation System A unit of the EPOS project.. *Journal of Sustainable Mining*, Tom 18(4), pp. 198-207.
- MUTKE G., MARCAK H., MUTKE F., BARAŃSKI A. 2017 - Metoda wyznaczania mapy rozkładu intensywności sejsmicznej I_{GSI} po wystąpieniu silnego wstrząsu pochodzenia górniczego. „Przeгляд Górnicy” nr 2, s. 51–58.
- NAKAMURA Y. 1989 - A method for dynamic characteristics estimations of subsurface using microtremors on the ground surface. *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*, Vol. 30, No 1, s. 25–33.
- NEWMARK N., ROSENBLUETH E. 1964 - *Fundamentals of earthquake engineering*. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall.
- OLSZEWSKA D., MUTKE G. 2018 - A study of site effect using surface-downhole seismic data in a mining area. *16th European Conference on Earthquake Engineering*. Thessaloniki, June 2018.
- Rozporządzenie** Ministra Środowiska z dnia 8 grudnia 2017 w sprawie planów ruchu zakładów górniczych (Dz.U. 2017 poz. 2293)
- SAWARIENSKIJ E.F. 1959 - Ocena wpływu warstwy nadkładu na amplitudy drgań na powierzchni. *Izvestia Akad. Nauk SSSR, s. Geofizyka* 10, s. 1441–1447 (po rosyjsku).
- WALD D.J., V. QUITORIANO T.H. HEATON, AND H. KANAMORI 1999 - Relationship between peak ground acceleration, peak ground velocity, and modified mercalli intensity in California, *Earthq. Spectra* 15, 3, 557-564, DOI: 10.1193/1.1586058.

Artykuł wpłynął do redakcji – marzec 2020
Artykuł akceptowano do druku – 30.04.2020