

**Ewelina Kilian – Błażejewska**

Institut Inżynierii Wody i Ścieków  
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki  
Politechnika Śląska  
Akademicka 2A, 44 – 100 Gliwice, Poland  
e – mail: eewelina.kilian@gmail.com

**Wpływ wybranych czynników na intensywność uszkodzeń przewodów podsystemu dystrybucji wody, zlokalizowanych na terenie oddziaływania wstrząsów pochodzenia górniczego**

**The influence of selected factors on the failure rate of the pipelines located on the area of the impact of mining tremors**

**Słowa kluczowe:** *podsystem dystrybucji wody, wstrząsy górnicze, intensywność uszkodzeń przewodów sieci wodociągowej*

**Keywords:** *Water distribution system, mining tremors, failure rate of water pipelines*

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono badania wpływu wybranych czynników, w tym wstrząsów pochodzenia górniczego, opisanych za pomocą parametru  $PGV_{Hmax}$  na intensywność uszkodzeń przewodów podsystemu dystrybucji wody. Jako zmienne niezależne w utworzonych modelach regresji wielorakiej przyjęto: średnicę i materiał z którego wykonane są przewody, czas pracy bezuszkodzeniowej, wiek przewodów, wysokość ciśnienia i  $PGV_{Hmax}$ . Wartości  $PGV_{Hmax}$  w miejscach występowania awarii przewodów wodociągowych, wyznaczone zostały na podstawie zbudowanych modeli propagacji fali drgań w ośrodku gruntowym. Analiza przeprowadzona została dla próby losowej obejmującej sumarycznie wszystkie przewody sieci wodociągowej magistralnej, rozdzielczej i przyłącza oraz dla wyodrębnionych z tej grupy prób losowych obejmujących: przewody zbudowane ze stali i z żeliwa szarego, przewody z uwzględnieniem ich średnicy, średnicy i materiału oraz z uwzględnieniem czasu ich budowy.

**Abstract:** The article presents the influence of the selected factors, including mining tremors, described by the parameter  $PGV_{Hmax}$  on the failure rate of the water distribution pipelines. In created multiple regression models, the following independent variables were used: diameter and material from which the pipes were made, working time without failure, the age of pipes, the value of pressure and  $PGV_{Hmax}$ . The values of  $PGV_{Hmax}$  in places with damaged water pipelines were determined by constructed the seismic wave propagation models. The analysis was carried out for a random sample of all water pipelines and extracted from this sample new groups: steel and gray cast iron pipes, their diameters, diameters and materials, and their construction time.

## **1. Wprowadzenie**

Systemy zaopatrzenia w wodę są częścią kluczowej, dla funkcjonowania gospodarki i społeczeństwa, infrastruktury technicznej. Do głównych zadań systemów zaopatrzenia w wodę należą: dostawa wody w wymaganej ilości, jakości oraz pod odpowiednim ciśnieniem [51]. Utrzymanie funkcjonalności i ciągłości działania tych systemów, wymaga zapewnienia ich odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa [30,53,34,46], do czego zobowiązuje m. in. Dyrektywa Rady 2008/114/WE [8] oraz Ustawa z dnia 26 kwietnia 2007 r. o zarządzaniu kryzysowym [50]. Procedury ochrony infrastruktury krytycznej, do której zakwalifikowane zostało zaopatrzenie w wodę, jak również procedury wyznaczania niezawodności i bezpieczeństwa dostaw wody do odbiorców, obejmują w pierwszej

kolejności, identyfikację wszystkich czynników stwarzających zagrożenie [7,9,34,35,43,44,45].

W literaturze [5,15,17,29,35,40] spotkać można wiele analiz, dotyczących wpływu różnych czynników na intensywność uszkodzeń przewodów podsystemu dystrybucji wody. Wśród analizowanych czynników należy wymienić: średnicę, materiał, temperaturę otoczenia i wody w sieci wodociągowej, długość przewodów, średni opad deszczu, typ przewodu, głębokość ułożenia, czas pracy bezuszkodzeniowej, wysokość ciśnienia, rodzaj gruntu, agresywność medium i gruntu jak również wpływ eksploatacji górniczej, definiowany wyłącznie jako zmienna jakościowa (zero – jedynkowa). Wpływ wstrząsów górniczych na intensywność uszkodzeń przewodów podsystemu dystrybucji wody, nie był do chwili obecnej analizowany.

Zgodnie z powyższym, w celu uzupełnienia przeprowadzanych analiz awaryjności i niezawodności systemów zlokalizowanych na terenach górniczych, konieczne staje się uwzględnienie w analizach odpowiednio opisanego czynnika, informującego o wpływie wstrząsów górniczych.

Eksploatacja górnicza bardzo często prowadzona jest w Polsce pod obszarami silnie zurbanizowanym, gęsto uzbrojonymi w podziemną, liniową infrastrukturę techniczną tj. sieci: wodociągowe, kanalizacyjne, gazowe, ciepłownicze, teletechniczne. Stwarza to liczne zagrożenia zarówno dla powierzchniowych obiektów kubaturowych jak i dla sieci uzbrojenia podziemnego.

Sieci wodociągowe charakteryzują się różnymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi, materiałowymi, sposobami połączeń, różny jest ich wiek i stan techniczny. Z tych właśnie powodów, przewody charakteryzuje zróżnicowana reakcja dynamiczna na dodatkowe obciążenia, wynikające z górniczo deformowanego terenu oraz z drgań powierzchniowych indukowanych wstrząsami górniczymi. Dodatkowo, bardzo trudna pozostaje identyfikacja stanu technicznego poszczególnych przewodów, czyli ich realnej wytrzymałości na obciążenia, co znacznie utrudnia przeprowadzanie zaawansowanych analiz.

Dla terenów sejsmicznych, opracowane zostały zależności opisujące wpływ trzęsień ziemi o określonych parametrach na intensywność uszkodzeń przewodów sieci wodociągowej. Przeprowadzane badania [23,39] wykazały, że PGV (Peak Ground Velocity - szczytowe wartości prędkości drgań gruntu) lepiej koreluje z uszkodzeniami rurociągów spowodowanymi trzęsieniami ziemi niż PGA (Peak Ground Acceleration - szczytowe wartości przyspieszenia drgań gruntu). Wykazano, że PGV jest kierunkowo skorelowany z maksymalnymi odkształceniami gruntu – główną przyczyną uszkodzenia rurociągów podczas propagacji fali sejsmicznej. PGA lepiej koreluje z siłami bezwładności, które nie wpływają na obiekty podziemne. Pineda - Poras i Ordaz [42] wykazali, że model predykcji intensywności uszkodzeń przewodów sieci wodociągowej, oparty o parametr PGV, powoduje przeszacowanie liczby awarii powodowanych przez trzęsienia ziemi o magnitudzie 8,0 – 8,1 i mniejszej oraz niedoszacowanie liczby awarii dla silniejszych trzęsień ziemi. Parametrem, który lepiej opisuje zależność pomiędzy trzęsieniami ziemi a intensywnością uszkodzeń przewodów jest  $PGV^2/PGA$ .

Poza budową modeli empirycznych, przeprowadzonych zostało wiele innych, różnorodnych badań, dotyczących wpływu parametrów trzęsień ziemi na rurociągi zagłębione w gruncie. Przykładowo Wang and Cheng [52] wykazali poprzez budowę statycznego modelu numerycznego, że zachowanie rurociągu obciążonego trzęsieniem ziemi zależy od czasu przejścia fali jak również od niejednorodności gruntu, w którym zagłębiona jest rura. Takada i Tanabe [48] opracowali trójwymiarowy statyczny model numeryczny dla rurociągów oraz ich połączeń obciążonych dużymi trzęsieniami ziemi. Wykazano, że propagacja fal drgań w poszczególnych miejscach charakteryzowana jest przez szczytowe wartości parametrów równie dobrze jak przez prędkość propagacji fali. O'Rourke and Liu

[37] analizowali odkształcenia i krzywiznę gruntu powstające podczas propagacji fali trzęsienia ziemi, w zależności od różnych warunków gruntowych, na tworzenie się odkształceń powierzchni. Przejściowe odkształcenia powierzchni gruntu uważane są za najważniejsze z punktu widzenia wpływu propagacji fal sejsmicznych na podziemne obiekty liniowe tj. rurociągi i tunele. Lee [33] analizowała historię trzęsień ziemi i na jej podstawie badała wpływ parametrów trzęsień ziemi na zagłębiony gazociąg w gruncie z uwzględnieniem: typu materiału rurociągu (plastyczny, kruchy), średnicy, własności gruntu, głębokości ułożenia z uwzględnieniem lokalizacji (obszar mieszkalno przemysłowy, droga publiczna, tereny portowe - rurociąg zanurzony, itp.). O'Rourke and Ayala, [36] wykazali, że rurociągi wykonane z elastycznych materiałów są bardziej odporne na trzęsienia ziemi niż rurociągi kruche. Podobnie Bouziou and O'Rourke [4] wskazali że najbardziej odpornym na trzęsienie ziemi, które wystąpiło w dniu 22 lutego 2011 r. w miejscowości Christchurch materiałem przewodów wodociągowych był polichlorek winylu (PVC). O'Rourke i inni [38] analizowali zachowanie gruntu na płaszczyźnie styku z rurociągiem pod wpływem oddziaływania deformacji gruntu powodowanych trzęsieniami ziemi. Badania wykazały że wymagana jest zmiana założeń projektowych (obliczenia statycznie - wytrzymałościowe) pod kątem występujących sił od spodu rurociągu.

Wpływ trzęsień ziemi na podziemne, liniowe obiekty infrastruktury technicznej jest stosunkowo dobrze opisany w wielu pozycjach literaturowych na całym świecie. Problemem budowanych modeli propagacji fal sejsmicznych jest w dalszym ciągu dokładność modeli, na które wpływa duża różnorodność czynników, przyczyniających się do powstania określonego wpływu trzęsień ziemi na powierzchnię i obiekty.

Biorąc pod uwagę istotne różnice pomiędzy trzęsieniami ziemi a wstrząsami górniczymi, implementacja opracowanych dla trzęsień ziemi zależności, może być utrudniona i wymaga wykonania odpowiednich analiz. Nie zmienia to jednak faktu, że bogate opracowania dotyczące fal sejsmicznych stanowiąc mogą znakomite źródło wiedzy dla analiz wpływu wstrząsów górniczych na podziemne, liniowe obiekty techniczne.

Różnice pomiędzy trzęsieniami ziemi a wstrząsami górniczymi wynikają m in. z [55]:

- wielkości i intensywności – silne wstrząsy górnicze można porównać wyłącznie z małymi trzęsieniami ziemi,
- czasu trwania wymuszenia kinematycznego – czas trwania wstrząsów górniczych wynosi kilka sekund, podczas gdy trzęsienie ziemi może trwać 10-30 s,
- właściwości zapisów widmowych – co jest powodem znaczących różnic w oddziaływaniu zjawisk na obiekty budowlane,
- wartości szczytowych ruchu podłoża (PGA, PGV, PGD – trwała deformacja podłoża),
- różnic pomiędzy składowymi pionowymi i poziomymi drgań gruntu.

Stosunkowo prosto można zidentyfikować uszkodzenia rurociągów spowodowane trzęsieniami ziemi. Jest to możliwe dzięki skali oddziaływania zjawiska, jak również możliwości skorelowania jego wystąpienia ze wzrostem przepływu (na podstawie danych z monitoringu), informującym o wzroście ilości awarii systemu dystrybucji wody. Dodatkowo sama lokalizacja awarii może być prostsza, ze względu na wielkość i intensywność wypływu wody z uszkodzonego przewodu.

W przypadku awarii rurociągów, które mogą być spowodowane oddziaływaniem wstrząsów górniczych, sytuacja jest bardziej skomplikowana ponieważ może dotyczyć wyłącznie jednostkowych uszkodzeń, które z powodu niewystarczających badań, trudno wyodrębnić z grupy innych przyczyn powstania awarii.

W literaturze niejednokrotnie zwracano uwagę, że wpływ wstrząsów górniczych na obiekty liniowe zagłębione w gruncie nie jest wystarczająco poznany [20,21,22] lub

traktowany jest jako drugorzędny [28]. W pracy [22] wskazano że jednoznaczne określenie wpływu wstrząsów górniczych na uszkodzalność rurociągów było trudne, ze względu na możliwe przesunięcie czasowe przyczyny i skutków uszkodzeń. Pomimo tego, spotyka się publikacje przedstawiające wyniki badań (przede wszystkim analizy numeryczne lub statycznie - wytrzymałościowe), dotyczących wpływu wstrząsów górniczych na obiekty liniowe.

Dulińska [11] badała oddziaływanie drgań powierzchniowych na konstrukcję gazociągu, poprzez obliczenia odpowiedzi dynamicznej obiektu na silne wstrząsy. W analizach rozpatrywano 100 m odcinek gazociągu, uwzględniono 3 warianty gruntu: piaski suche, gliny ilaste i żwiry piaszczyste, założono sprężystą współpracę rury z gruntem w kierunku pionowym i poziomym. Badano model nierównomiernego wymuszenia kinematycznego (w każdym punkcie rurociągu w danej chwili działa inne wymuszenie kinematyczne). Analiza wykazała że większe odpowiedzi dynamiczne na wymuszenia kinematyczne uzyskiwane są dla mniejszych prędkości propagacji fali. Struktura częstotliwościowa drgań gruntu wpływa na wielkość odpowiedzi gazociągu, nawet w przypadku zbliżonych max amplitud drgań przy różnych strukturach częstotliwościowych. Max naprężenia powstałe w gazociągu pod wpływem działającego wstrząsu wyniosły 18 MPa czyli 10% wytrzymałości stali. W pracach [24] i [25] zwrócono uwagę na konieczność każdorazowego analizowania oddziaływania drgań podłoża na gazociągi oraz badanie ich odpowiedzi dynamicznej na zaistniałe drgania. Takie postępowanie, ma na celu zapobieganie możliwym konsekwencjom uszkodzeń starych stalowych gazociągów. Dulińska i Jasińska [12] badały za pomocą metod numerycznych zachowanie 100 m rurociągu stalowego ułożonego na betonowych podporach podczas wstrząsu sejsmicznego. Analizowane było rozchodzenie się fali drgań wzdłuż rurociągu. W rurociągu, w zależności od założonego modelu, obserwowane były, bądź nie, pęknięcia w miejscu lokalizacji podpór betonowych. Boron P., Dulińska J., [3] analizowali numeryczną odpowiedź połączeń (z uwzględnieniem śrub, kołnierzy i bloku oporowego) stalowych rurociągów na oddziaływanie wstrząsu sejsmicznego. Uzyskane odkształcenia śrub wskazały występowanie dużych wartości sił zginających, w miejscach połączeń rurociągu. W pracy [25] przedstawiona została analiza oddziaływania wstrząsu o energii  $8 \cdot 10^7$  J na gazociąg stalowy DN200, niskiego ciśnienia, wyposażony w kompensatory dławikowe i charakteryzujący się dobrym stanem technicznym. W ramach pracy przeprowadzona została analiza statycznie – wytrzymałościowa i kinematyczna dla odcinka prostego gazociągu o długości 50 m oraz łuku  $90^\circ$ . Przeprowadzona analiza wykazała że siły (przemieszczenia, naprężenia i odkształcenia) działające na gazociąg przyjmują wartości niższe od sił wywołanych przez ciągłe deformacje podłoża. Kurzeja J. [26] badała wpływ wstrząsów górniczych na węzeł autostrady A1 Piekary Śląskie. Analiza wskazała, że nie ma negatywnego wpływu wstrząsów górniczych na autostradę. Wnioskowanie przeprowadzone zostało na podstawie systematycznych obserwacji stanu autostrady.

Przedstawione w niniejszym artykule badania, mają na celu opracowanie zależności pomiędzy wstrząsami górniczymi, opisanymi za pomocą parametru  $PGV_{Hmax}$  a intensywnością uszkodzeń przewodów podsystemu dystrybucji wody z uwzględnieniem ich średnicy, materiału z którego zostały wykonane, czasu budowy, czasu pracy bezuszkodzeniowej oraz wysokości ciśnienia wody w przewodach. Są to pierwsze wyniki tego typu analiz publikowane w literaturze.

Opracowane zależności mogą posłużyć do prognozowania uszkodzeń przewodów sieci wodociągowych w analizowanym rejonie, znajdujących się pod wpływem oddziaływania obciążeń dynamicznych eksploatacji górniczej.

## 2. Metodyka badań

Przedmiotem badań był rzeczywisty podsystem dystrybucji wody, zlokalizowany w zasięgu wpływów naprężeń dynamicznych, spowodowanych wstrząsami pochodzenia górniczego. Przeprowadzone badania obejmowały analizę wszystkich awarii podsystemu dystrybucji wody oraz rejestracji wstrząsów górniczych o energii  $E \geq 10^6$  J, występujących latach 2011-2014.

Zakres badań obejmował:

1. wyznaczenie lokalnej relacji tłumienia drgań gruntu dla wstrząsów górniczych opisanych za pomocą parametru  $PGV_{Hmax}$ ,
2. wyznaczenie wartości  $PGV_{Hmax}$  w miejscach występowania awarii przewodów wodociągowych,
3. budowę modeli regresji wielorakiej w celu identyfikacji czynników wpływających na intensywność uszkodzeń przewodów podsystemu dystrybucji wody.

### 2.1. Lokalna relacja tłumienia drgań gruntu dla wstrząsów górniczych opisanych za pomocą parametru $PGV_{Hmax}$

W literaturze [1,6,14,19,26], przedstawionych zostało wiele prób wyznaczania empirycznych zależności pomiędzy danym parametrem sejsmicznym a czynnikami wpływającymi na jego wielkość. Zależności te wyznaczone były zarówno dla wstrząsów górniczych jak i dla trzęsień ziemi.

W 1999 roku Si H. i Midorikawa S. [48] opracowały model regresji w którym jako czynniki wpływające na wielkość efektu sejsmicznego przyjęte zostały: energia wstrząsu, mechanizm ogniska, odległość od źródła wstrząsu oraz po raz pierwszy: budowa geologiczna ośrodka gruntowego.

Model posiada następującą postać:

$$\log A = b - \log R - k \cdot R \quad (1)$$

gdzie:

A – parametr sejsmiczny np.: PGV (Peak Ground Velocity - szczytowe wartości prędkości drgań gruntu), PGA (Peak Ground Acceleration - szczytowe wartości przyspieszenia drgań gruntu) lub PGD (Peak Ground Displacement - szczytowe wartości przemieszczeń gruntu),  
R – odległość od źródła wstrząsu, [m],

$$R = \sqrt{d^2 + h^2} \quad (2)$$

d – odległość epicentralna, [m],

h – pseudogłębokość (parametr zapewniający nieliniowość relacji dla małych odległości od źródła wstrząsu, dobrany tak aby błąd standardowy estymacji był jak najmniejszy), [m],

k – współczynnik przyjmujący następujące wartości: dla PGV – 0,002 dla PGA – 0,003, [-],

b – wskaźnik przesunięcia wyznaczany dla każdego zjawiska sejsmicznego z zależności, [-],

$$b = a \cdot \log E + c \cdot R + \sum d_i \cdot S_i + e + \varepsilon \quad (3)$$

gdzie:

a, c, d, e – współczynniki regresji estymowane z pomiarów sejsmometrycznych, [-],

E – energia wstrząsu, [J],

$S_i$  – klasyfikator gruntu, parametr jakościowy, odległość  $d_i$  zależy od ilości przyjętych klas gruntu i, przyjęty w niniejszych badaniach zgodnie z Eurokod 8 (Tab. 1) [13], [-]

$\varepsilon$  – parametr reprezentujący czynnik losowy, [-].

R – jak we wzorze (1)

Tab. 1. Klasyfikacja typu gruntu wg. Europejskiej Normy Eurokod 8 [13].  $V_{s,30}$  - średnia prędkość propagacji fal S w warstwach gruntu do głębokości 30 m.

Typ gruntu	Opis stratygraficzny	$V_{s,30}$ , m/s
A	Skąły lub inne skalne formacje geologiczne z co najwyżej pięciometrową słabą warstwą przypowierzchniową	>800
B	Piaski, żwiry i twarde gliny, co najmniej kilkunastometrowej miąższości, charakteryzujące się stopniowym wzrostem własności mechanicznych z głębokością	360-800
C	Gęste lub średnio gęste piaski, żwiry lub twarde gliny o miąższości od kilkunastu do kilkuset metrów	180-360
D	Utwory słabo lub średnio zwarte	<180
E	Profil gleby składający się z warstwy aluwium z wartością $V_s$ odpowiadającą typom gruntu C i D oraz grubością 5-20m, leżącej na warstwie o $V_s > 800$ m/s	-

Parametrem przyjętym w niniejszej analizie do opisu drgań gruntu (parametr sejsmiczny) była maksymalna amplituda prędkości drgań poziomych, wyznaczona jako poziome maksimum długości wektora drgań gruntu ( $PGV_{Hmax}$ ).

Model (1) stał się podstawą do opracowania relacji tłumienia drgań gruntu dla rejonu, w którym usytuowany jest badany podsystem dystrybucji wody oraz do wyznaczenia wartości parametru sejsmicznego w miejscach występowania awarii wodociągowych.

## 2.2. Wyznaczenie wartości $PGV_{Hmax}$ w miejscach występowania awarii przewodów wodociągowych

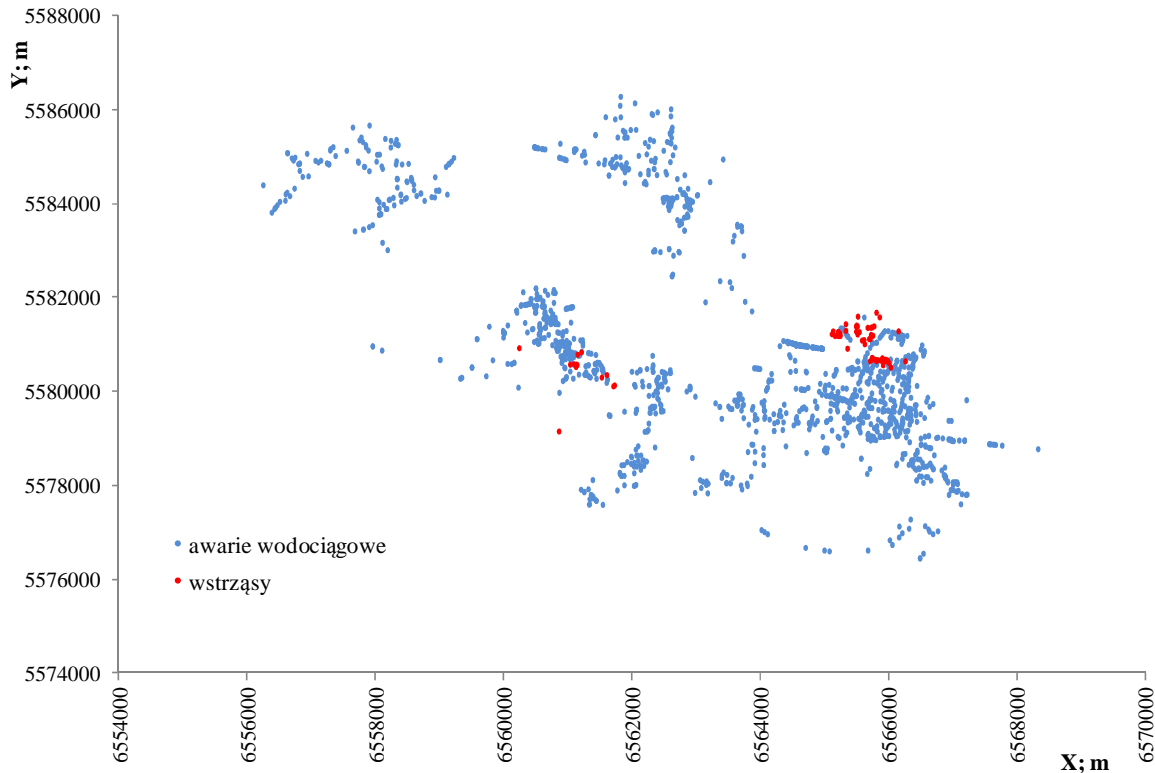
Procedura wymagała przyporządkowania poszczególnym wstrząsom górniczym powodowanych przez nie awarii przewodów wodociągowych. W tym celu konieczne stało się przyjęcie następującego założenia: wstrząs górniczy może być przyczyną każdej awarii wodociągowej występującej do 30 dni po wstrząsie.

Konieczność przyjęcia tego założenia, spowodowana była rodzajem posiadanych przez przedsiębiorstwo wodociągowe danych o awariach przewodów wodociągowych. Analizowana baza danych posiadała wyłącznie zestawienia czasu rozpoczęcia prac budowlanych związanych z usuwaniem poszczególnych awarii. Dla celów badań ważne było uzyskanie informacji o czasie zaistnienia awarii. Moment wystąpienia awarii ze względu na dużą liczbę niewiadomych oraz małą dokładność urządzeń pomiarowych nie jest możliwy w chwili obecnej do dokładnego ustalenia. Zgodnie z powyższym założone 30 dni stanowi pewnego rodzaju bufor, w którym dana awaria mogła się rozpocząć.

W badaniach nie zostało przyjęte żadne przestrzenne ograniczenie dotyczące maksymalnej odległości, pomiędzy danym wstrząsem, a awarią przewodu wodociągowego, w związku z nieznanym efektywnym zasięgiem oddziaływania wstrząsów górniczych na podziemne obiekty liniowe.

Wyznaczenie wartości  $PGV_{Hmax}$  w miejscu występowania awarii sieci wodociągowej, z wykorzystaniem modelu powstałego na podstawie równania (1), wymagało: przeprowadzenia klasyfikacji gruntu w miejscu występowania poszczególnych awarii zgodnie z Eurokod 8 [13] oraz wyznaczenia odległości epicentralnej (pomiędzy wstrząsem górniczym a awarią wodociągową) w oparciu o posiadane współrzędne geograficzne.

W przypadku gdy ta sama awaria wodociągowa, przypisana została do różnych wstrząsów górniczych, w analizie pozostawiano tę parę „wstrząs – awaria”, w której parametr  $PGV_{Hmax}$  przyjmował wyższą wartość. Ostatecznie otrzymano 993 pary „wstrząs – awaria”. Na Rys. 1 przedstawiono przestrzenne rozmieszczenie wszystkich analizowanych wstrząsów górniczych i awarii podsystemu dystrybucji wody.



Rys. 1. Wstrząsy górnicze o  $E \geq 10^6 J$  i awarie sieci wodociągowej występujące w latach 2011 – 2014.

### 2.3. Wpływ wybranych czynników na intensywność uszkodzeń przewodów podsystemu dystrybucji wody

W kolejnym etapie badań dla poszczególnych przewodów wodociągowych, scharakteryzowanych za pomocą parametrów: liczba awarii, średnica, materiał, wiek itp. przypisano średnią wartość  $PGV_{Hmax}$  ze wszystkich miejsc występowania awarii wodociągowych na danym przewodzie. W badaniach, poprzez przewód wodociągowy, rozumiano odcinki sieci wodociągowej magistralnej i rozdzielczej oraz przyłącza, posiadające jednorodne parametry w zakresie: średnicy, materiału oraz czasu budowy. Analizę wpływu wybranych czynników na intensywność uszkodzeń przewodów podsystemu dystrybucji wody przeprowadzono dla grupy 792 przewodów.

W modelu regresji wielorakiej, wpływu wybranych czynników na jednostkową intensywność uszkodzeń przewodów podsystemu dystrybucji wody, przyjęto następujące zmienne:

- jednostkowa intensywność uszkodzeń przewodów ( $\lambda$ ) – zmienna zależna budowanych modeli regresji, oraz zmienne niezależne:
- materiał (M) i średnica poszczególnych przewodów (DN),
- średnia wysokość ciśnienia w miejscu występowania awarii na danym przewodzie (P),
- średni wiek przewodu w momencie uszkodzenia (W),

- czas pracy bezuszkodzeniowej przewodu w analizowanym czasie ( $T_p$ ),
- $PGV_{Hmax}$ ,

Najczęściej stosowanymi parametrami do oceny awaryjności przewodów wodociągowych są: strumień uszkodzeń  $\omega(t)$  lub intensywność uszkodzeń  $\lambda(t)$ . Przyjmując założenie, że strumień uszkodzeń jest strumieniem: bez następstw (pojawiające się w poszczególnych czasach  $\Delta t$  uszkodzenia są niezależne), pojedynczym (prawdopodobieństwo wystąpienia więcej niż jednego uszkodzenia na dowolnie małym odcinku czasu dąży do zera) i stacjonarnym (prawdopodobieństwo zaistnienia  $k$  uszkodzeń w przedziale czasu  $\Delta t$  zależy tylko od tego przedziału, a nie zależy od położenia na osi czasu), otrzymuje się równość tego parametru z intensywnością uszkodzeń  $\lambda(t) = \omega(t) = \text{const}$  [50,52]. W oparciu o przedstawione założenie, w przeprowadzonych badaniach awaryjność przewodów wodociągowych opisana została za pomocą wskaźnika intensywności uszkodzeń.

Jednostkowa intensywność uszkodzeń  $\lambda(\Delta t)$  dla elementów liniowych (rurociągi) wyraża równanie [31,53]:

$$\lambda(\Delta t) = \frac{n(\Delta t)}{L \Delta t}; [\text{uszk.}/(\text{km} \cdot \text{a})] \quad (4)$$

gdzie:

$\lambda(\Delta t)$  – jednostkowa intensywność uszkodzeń obiektów liniowych, [uszk./(\text{km} \cdot \text{a})],

$n(\Delta t)$  – liczba uszkodzeń w przedziale czasu  $\Delta t$ ,

$L$  – średnia długość badanych rurociągow w przedziale czasu  $\Delta t$ , [km],

$\Delta t$  – przedział czasu na jaki podzielono okres obserwacji, [a].

Intensywność uszkodzeń analizowanych przewodów sieci wodociągowej wynosiła  $\lambda_{maxs} = 200$  uszk./(\text{km} \cdot 4\text{lata}), mediana = 8,8 uszk./(\text{km} \cdot 4\text{lata}), a intensywność uszkodzeń przyłączy  $\lambda_{maxp} = 2000$  uszk./(\text{km} \cdot 4\text{lata}), mediana = 93,9 uszk./(\text{km} \cdot 4\text{lata}).

System zaopatrzenia w wodę można traktować jako odnawialny (występujące cyklicznie stany pracy i niesprawności), z punktu widzenia teorii niezawodności. Nazywa się on „modelem dwustanowym z odnową niezerową” [31,53]. W przypadku gdy czas pracy bezuszkodzeniowej ma rozkład wykładniczy:

$$T_p = \frac{1}{\lambda} \quad (5)$$

gdzie:

$T_p$  – średni czas pracy bezuszkodzeniowej elementu, [lata]

$\lambda$  – intensywność uszkodzeń obiektów liniowych, [uszk./(\text{km rok})],

W przeprowadzonej analizie czas pracy bezuszkodzeniowej zawierał się w przedziale (26 – 730) dni. Należy zaznaczyć, że większość przewodów (w szczególności przyłącza) ulegała uszkodzeniu jeden raz w analizowanym czasie, czas pracy bezuszkodzeniowej przyjmował wtedy tą samą wartość równą 730 dni (mediana).

Wysokość ciśnienia w miejscu występowania awarii wodociągowych, obliczona została na podstawie znajomości (odczyt z wykresów monitoringu) wysokości ciśnienia w punkcie zasilającym dany przewód lub rejon sieci wodociągowej, w której usytuowany był dany przewód oraz różnicy wysokości pomiędzy punktem zasilającym a miejscem wystąpienia awarii, odczytanej z numerycznego modelu terenu. Dla poszczególnych przewodów, wysokość ciśnienia wyznaczona została jako średnia arytmetyczna wysokości ciśnienia ze wszystkich miejsc występowania awarii na danym przewodzie.



Wysokość ciśnienia dla wszystkich analizowanych przewodów zawierała się w przedziale (13,39 - 86,87) m. sł. w., podczas gdy mediana wynosiła: 44,48 m. sł. w.

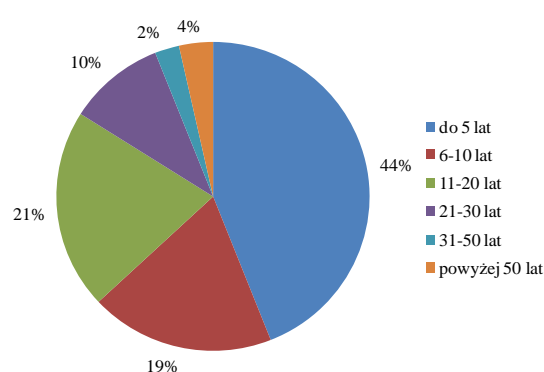
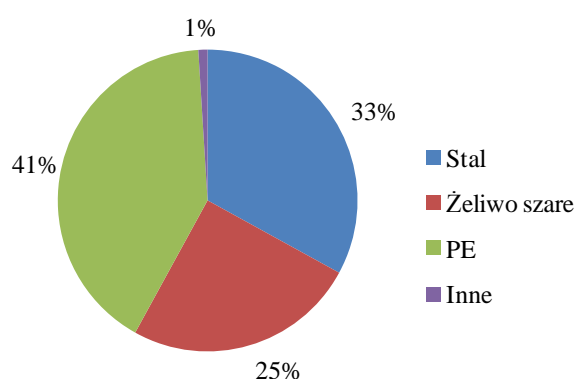
Modele regresji, opracowane zostały dla próby losowej składającej się z: przewodów sieci wodociągowej magistralnej, rozdzielczej i przyłączy oraz dla wyodrębnionych z tej próby losowej grup przewodów: przewody zbudowane ze stali, przewody zbudowane z żeliwa szarego, przewody o średnicach: DN80, DN100, DN150, DN100 zbudowane ze stali, DN100 zbudowane z żeliwa szarego, DN150 zbudowane ze stali, przewody wybudowane w następujących przedziałach czasu: 1885-1920, 1922-1938, 1939-1961, 1962-1978, 1979-1994, 1995-2012.

Analiza wykonana została w pakiecie oprogramowania Statistica (Statsoft) z wykorzystaniem regresji wielorakiej.

## 2.4. Charakterystyka badanego podsystemu dystrybucji wody

Badany podsystem dystrybucji wody zlokalizowany jest na Górnym Śląsku i odpowiada za dostawę wody do ok. 160 tys. mieszkańców gminy (163 tys. mieszkańców w 2011 r. i 157 tys. w 2014 r.). Źródłem zaopatrzenia w wodę podsystemu dystrybucji są ujęcia wód podziemnych i powierzchniowych, których właścicielem jest Górnośląskie Przedsiębiorstwo Wodociągów S. A. (GPW). Zakup wody od GPW odbywa się poprzez 56 studni zakupowych i średnio w analizowanych latach 2011 – 2014 wynosił 7,3 mln m<sup>3</sup>/rok, podczas gdy sprzedaż wody wyniosła średnio ok. 6,2 mln. m<sup>3</sup>/rok.

Sieć wodociągowa w zakresie średnic DN20 – DN600 ma ok. 450 km długości w tym ok. 200 km położonych jest w zasięgu oddziaływania eksploatacji górniczej. Przewody sieci wodociągowej wykonane są przede wszystkim z: polietylenu, stali i żeliwa (Rys. 2), i eksploatowane są w większości (60%) przez czas krótszy niż 10 lat (Rys. 3).



Rys. 2. Struktura materiałowa sieci wodociągowej w roku 2014. Na wykresie „Inne” – azbestocement i PVC.

Rys. 3. Struktura wiekowa sieci wodociągowej w roku 2014.

Wartość wskaźnika intensywności uszkodzeń dla badanego podsystemu dystrybucji wody w poszczególnych latach (Tab. 2) świadczy o dużej awaryjności przewodów wodociągowych  $\lambda > 0,5$  uszk./(km·rok).

Tab. 2. Zestawienie wartości jednostkowej intensywności uszkodzeń w latach 2011 – 2014 dla badanego podsystemu dystrybucji wody.

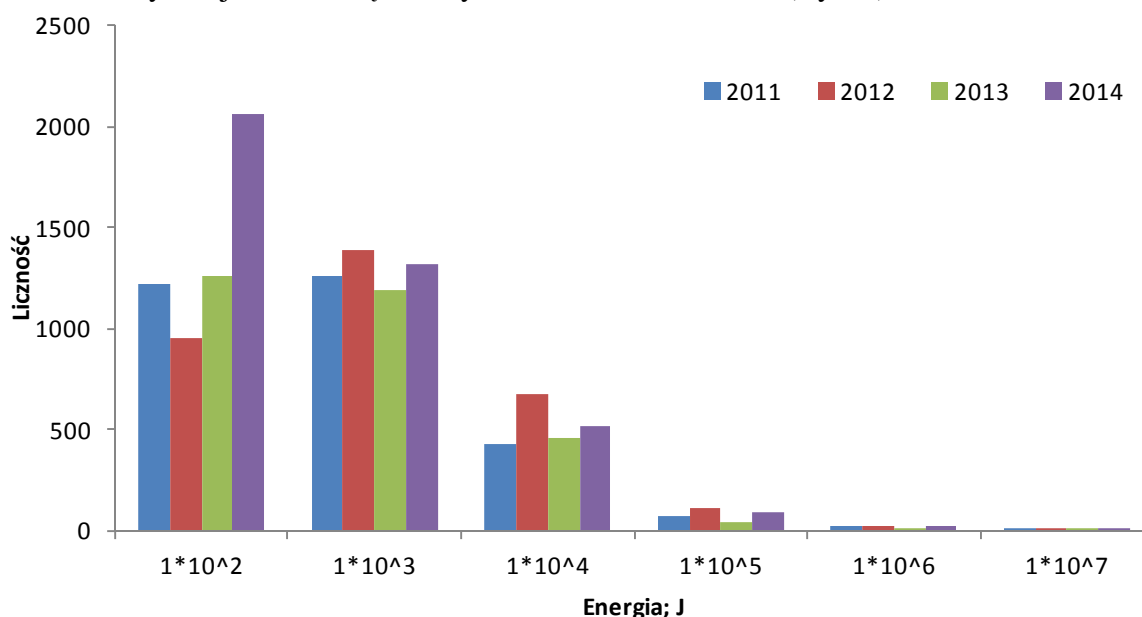
Rok	Liczba awarii	Długość sieci; km	Jednostkowa intensywność uszkodzeń $\lambda$ ; uszk./(km·rok)
2011	445	443,9	1,00
2012	532	444,9	1,20

2013	299	456,4	0,66
2014	285	454,6	0,63

## 2.5. Charakterystyka wstrząsów górniczych występujących w analizowanym rejonie

Badany podsystem dystrybucji wody zlokalizowany jest na terenie gminy, w której od XIX wieku prowadzona jest aktywna eksploatacja górnictwa.

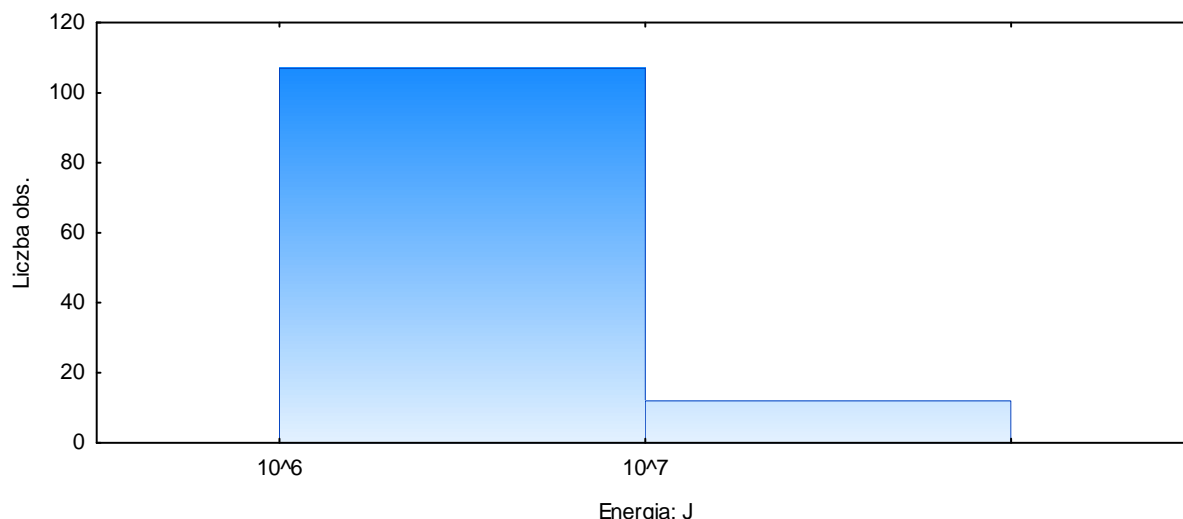
W chwili obecnej wstrząsy górnicze rejestrowane są na 7 stanowiskach pomiarowych wyposażonych w aparaturę Amax-GSI, produkowaną w Głównym Instytucie Górnictwa. Aparatura Amax-GSI [41] jest wielokanałową aparaturą specjalistyczną, służącą do bezpośredniego pomiaru drgań na powierzchni. Rejestracja przyspieszeń drgań gruntu odbywa się za pomocą rejestratora i trójskładowego zespołu akcelerometrów piezoelektrycznych. Dzięki możliwości scałkowania sygnału, uzyskuje się zapis prędkości drgań w trzech prostopadłych płaszczyznach. Zakres energetyczny rejestrowanych na analizowanym rejonie wstrząsów wynosi od  $1 \cdot 10^2$  do  $1 \cdot 10^7$  J (Rys. 4).



Rys. 4. Zestawienie liczby wstrząsów rejestrowanych na obszarze górniczym badanej kopalni w zakresie energetycznym od  $1 \cdot 10^2$  do  $1 \cdot 10^7$  J w latach 2011-2014.

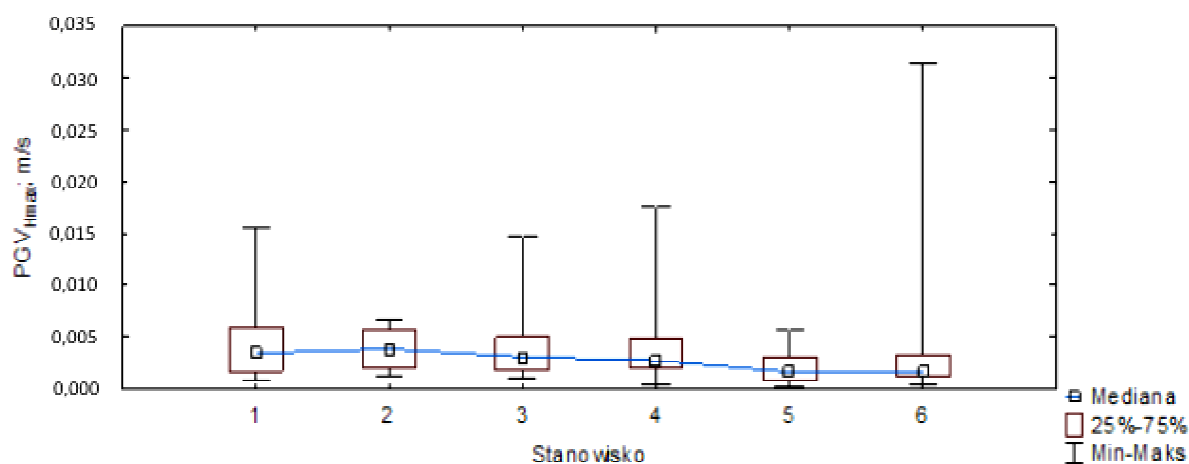
W analizowanym rejonie, najczęściej występuje wstrząsów słabych, nieodczuwalnych przez człowieka ( $E < 10^4$  J) i rejestrowanych wyłącznie przez specjalistyczną aparaturę.

W ramach badań analizowano wyłącznie wstrząsy o  $E \geq 10^6$  J rejestrowane na 6 stanowiskach pomiarowych ze względu na dużą liczbę niekompletnych zapisów na jednym ze stanowisk. Ostatecznie do analizy przyjęto 113 wstrząsów górniczych (252 rejestracji), których zestawienie energetyczne przedstawiono na Rys. 5.



Rys. 5. Histogram energii wstrząsów występujących w latach 2010 – 2014.

Na Rys. 6 przedstawiono wartości składowej poziomej prędkości drgań, rejestrowane na poszczególnych stanowiskach pomiarowych. Zakres rejestrowanych wartości wynosi od 0,0002 do 0,3150 m/s, podczas gdy mediana dla wszystkich stanowisk jest podobna i wynosi ok. 0,0030 m/s. Największa wartość prędkości drgań gruntu zarejestrowana została 16.02.2013 r. na 6 stanowisku pomiarowym natomiast najmniejsze wartości na stanowiskach 5 i 2.



Rys. 6. Rozkład median wartości składowej poziomej szczytowych prędkości drgań gruntu dla poszczególnych stanowisk pomiarowych dla wstrząsów o energii  $E \geq 10^6$  J występujących w latach 2010 – 2014.

### 3. Lokalna relacja tłumienia drgań gruntu

Estymację poszczególnych parametrów równania regresji przeprowadzono z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów. Z modelu wyeliminowane zostały zmienne niezależne, które charakteryzowały się najmniejszą wartością stosunku wariancji wyjaśnionej do niewyjaśnionej. Ostatecznie lokalna relacja tłumienia drgań gruntu dla  $\log PGV_{Hmax}$ , dla poziomu istotności  $\lambda = 0,05$  przyjęła następującą postać:

$$\log PGV_{Hmax} = 0,44937 \cdot \log E - 1,49304 \cdot \log R + 0,07623 \cdot S_i - 0,88661 \quad (8)$$

gdzie:

$PGV_{Hmax}$  – składowa pozioma szczytowej wartości prędkości drgań gruntu; [m/s],

$E$  – energia wstrząsu; [J],

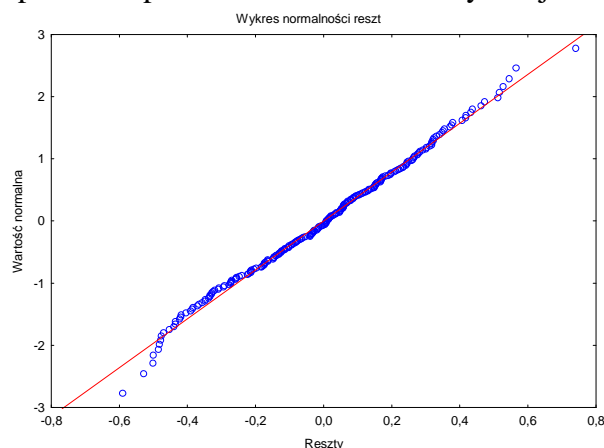
$R$  – odległość od źródła wstrząsu, dla pseudogłębokości  $h = 1022m$  dla której wartość błędu standardowego estymacji zgodnie z równaniem (3) przyjmuje najmniejszą wartość, [m],

$S_i$  – zmienna jakościowa przyjmująca wartość  $S_i = 0$  dla gruntu typu B i  $S_i = 1$  dla gruntu typu C; [-].

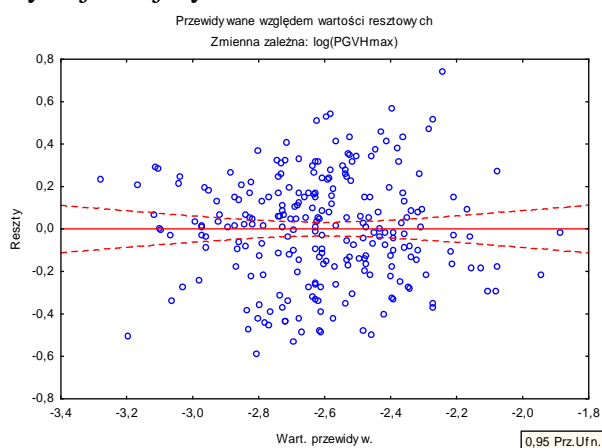
Współczynnik korelacji dla opracowanego modelu wynosi 0,68840. Wartość współczynnika determinacji  $R^2 = 0,47390$ , oznacza umiarkowane dopasowanie modelu do analizowanych danych. Na wartość otrzymanego współczynnika determinacji złożyły się m. in.: niedokładność wyznaczania energii i ognisk wstrząsów [2], nieuwzględnienie w modelach zróżnicowania radiacji energii z ogniska [2], nie rozpoznana w pełni budowa geologiczna ośrodka gruntowego [2], błędy pomiaru akcelometrów, błędy modelu regresji. W większości spotykanych w literaturze modeli propagacji fal sejsmicznych [2,6,10,26,27] współczynnik determinacji przyjmuje podobne wartości. Zgodnie z powyższym, postanowiono kontynuować analizę w oparciu o otrzymany model regresji.

Standardowy błąd estymacji modelu wynosi  $Se = 0,25344$  i oznacza, że szacowane wartości zmiennej  $\log PGV_{Hmax}$  różnią się od wartości empirycznych średnio o 0,25344 m/s.

Budowę modelu regresji wielorakiej zakończono analizą reszt, która potwierdziła spełnienie przez model założeń klasycznej metody najmniejszych kwadratów.



Rys. 7. Wykres normalności reszt modelu predykcji zmiennej  $\log PGV_{Hmax}$ .



Rys. 8. Wykres rozrzutu reszt modelu predykcji zmiennej  $\log PGV_{Hmax}$ .

#### 4. Wpływ wybranych czynników na intensywność uszkodzeń podsystemu dystrybucji wody

Wyniki analizy intensywności uszkodzeń wszystkich przewodów sieci wodociągowej oraz grup: przewodów stalowych i wykonanych z żeliwa szarego przedstawiono w Tab. 3.

Tab. 3. Zestawienie modeli regresji dla intensywności uszkodzeń przewodów wodociągowych.

Rodzaj przewodów	Model regresji	R, R <sup>2</sup> , Se
------------------	----------------	------------------------

Wszystkie przewody	$\log\lambda_{spv} = -0,03547 \cdot DN + 0,68996 \cdot M + 73,53762 \cdot PGV_{Hmax} + 0,00085 \cdot Tp + 1,62527$	R= 0,84113 R <sup>2</sup> = 0,70750 Se = 1,11430
Przewody stalowe	$\log\lambda_{spvs} = -0,04067 \cdot DN + 72,90571 \cdot PGV_{Hmax} + 3,17737$	R= 0,85774 R <sup>2</sup> = 0,73572 Se = 1,03300
Przewody z żeliwa szarego	$\log\lambda_{spvz} = -0,00297 \cdot DN - 0,00068 \cdot Tp - 1,42276$	R= 0,69170 R <sup>2</sup> = 0,47845 Se = 0,26376

W przypadku grupy wszystkich przewodów sieci wodociągowej oraz przewodów stalowych, otrzymane wartości współczynników determinacji, świadczą o dobrym dopasowaniu modeli do danych. Parametr  $PGV_{Hmax}$  informujący o oddziaływaniu wstrząsów górniczych, okazał się istotny w przypadku tych modeli i posiada dodatni wpływ na zmienną zależną. Największy wpływ na zmienną zależną w modelu dla wszystkich przewodów wywierają kolejno: DN i M, Tp i  $PGV_{Hmax}$ , a w przypadku przewodów stalowych: DN i  $PGV_{Hmax}$ . Przykładowo dla modelu zbudowanego dla przewodów stalowych w przypadku wzrostu  $PGV_{Hmax}$  o wartość 0,01 m/s, zmienna zależna  $\log\lambda_{spvs}$  wzrośnie o 0,72906 (intensywność uszkodzeń wzrośnie o 5,35797 uszk./(km·4lata)).

Dla przewodów wykonanych z żeliwa szarego, otrzymano słabszą zależność (R<sup>2</sup>= 0,47845) a zmienna informująca o oddziaływaniu wstrząsów górniczych na przewody wodociągowe okazała się nieistotna.

W całym zakresie analizowanych średnic przewodów (DN20 – DN600), tylko dla DN80, DN100 i DN150 udało się otrzymać zależności funkcyjne, pomiędzy wybranymi czynnikami a intensywnością uszkodzeń przewodów. Dla pozostałych zmiennych, albo brakowało wystarczającej liczby danych albo zmienne niezależne okazywały się nieistotne albo współczynniki korelacji i determinacji wynosiły zero. Zestawienie otrzymanych modeli regresji wielorakiej zawiera Tab. 3.

Tab. 4. Zestawienie modeli regresji dla intensywności uszkodzeń przewodów wodociągowych o średnicach DN80, DN100 i DN150.

Średnica	Model regresji	R, R <sup>2</sup> , Se
DN80	$\log\lambda_{sv80} = -0,01010 \cdot W - 1,20001$	R= 0,53986 R <sup>2</sup> = 0,29144 Se = 0,39376
DN100	$\log\lambda_{sv100} = -0,03320 \cdot W + 67,93168 \cdot PGV_{Hmax} - 0,00070 \cdot Tp - 1,60510$	R= 0,64731 R <sup>2</sup> = 0,41902 Se = 0,26561
DN150	$\log\lambda_{sv150} = -0,00113 \cdot Tp - 1,55594$	R= 0,66583 R <sup>2</sup> = 0,44333 Se = 0,29573

Tylko w modelu zbudowanym dla przewodów o średnicy DN100, zmienna opisująca wpływ wstrząsów górniczych okazała się istotna. Model wyjaśnia ok. 40% zmienności zmiennej zależnej. Współczynnik korelacji jest bliski wartości 0,65. Największy wpływ na

zmienną zależną posiadają kolejno:  $T_p$ ,  $PGV_{Hmax}$  i  $W$ . Modele zbudowane dla DN80 i DN150, posiadają niskie wartości współczynników determinacji.

W przypadku analizy intensywności uszkodzeń z uwzględnieniem średnic i materiałów, z których wykonane zostały przewody, udało się zbudować modele regresji wyłącznie dla przewodów: DN100 wykonanych ze stali, DN100 wykonanych z żeliwa szarego i DN150 wykonanych ze stali. Wyniki przeprowadzanych analiz zestawiono w Tab. 4.

Tab. 5. Zestawienie modeli regresji dla intensywności uszkodzeń przewodów wodociągowych poszczególnych średnic i materiałów.

Średnica i materiał	Model regresji	R, R <sup>2</sup> , Se
DN100 stal	$\log\lambda_{sv100s} = 64,44562 \cdot PGV_{Hmax} - 0,00083 \cdot T_p - 1,70361$	R= 0,68320 R <sup>2</sup> = 0,46677 Se = 0,25054
DN100 żeliwo szare	$\log\lambda_{sv100z} = - 0,00088 \cdot T_p - 1,63868$	R= 0,49176 R <sup>2</sup> = 0,24183 Se = 0,27936
DN150 stal	$\log\lambda_{sv150s} = - 0,00135 \cdot T_p - 1,45395$	R= 0,74349 R <sup>2</sup> = 0,55278 Se = 0,28652

Tylko w modelu dla przewodów wykonanych ze stali o średnicy DN100, zmienna opisująca wpływ wstrząsów górniczych ( $PGV_{Hmax}$ ) okazała się zmienną istotną. Zmienna posiada dodatni wpływ na intensywność uszkodzeń przedmiotowych przewodów. W modelu również  $T_p$  oraz wyraz wolny mają istotny wpływ na zmienną zależną. Model wyjaśnia ok. 47% zmienności zmiennej  $\log\lambda_{sv100s}$ .

Dla przewodów wykonanych z żeliwa szarego o średnicy DN100 oraz dla przewodów wykonanych ze stali o średnicy DN150, tylko  $T_p$  oraz wyraz wolny okazały się zmiennymi istotnymi. Otrzymana zależność dla przewodów żeliwnych DN100 jest bardzo słaba, wartość współczynnika determinacji wynosi zaledwie 25% i świadczy o braku zależności. Lepszy model udało się uzyskać dla przewodów stalowych DN150, w którym współczynnik determinacji wynosi ok. 55%.

W związku z tym że przeprowadzane badania obejmowały przewody wodociągowe w wieku nawet 129 lat, uzasadnionym wydaje się przeprowadzenie analiz awaryjności przewodów wykonanych w poszczególnych przedziałach czasu ( Tab. 6).

Tab. 6. Modele regresji dla intensywności uszkodzeń przewodów sieci wodociągowej i przyłączy wybudowanych w różnych okresach czasu.

Grupa	Lata	Model regresji	R, R <sup>2</sup> , Se
1	1885-1920	$\log\lambda_{spv(1885-1920)} = - 0,03320 \cdot DN + 1,34550 \cdot M + 216,44430 \cdot PGV_{Hmax} + 0,03000 \cdot P$	R= 0,90274 R <sup>2</sup> = 0,81494 Se = 1,06430
2	1922-1938	$\log\lambda_{spv(1922-1938)} = - 0,01687 \cdot DN + 1,61912$	R= 0,73161 R <sup>2</sup> = 0,53525

			Se = 1,57350
3	1939-1961	$\log\lambda_{\text{spv}(1939-1961)} = -0,04136 \cdot \text{DN} + 1,08442 \cdot \text{M} + 2,33101$	R= 0,86648 R <sup>2</sup> = 0,75078 Se = 1,09150
4	1962-1978	$\log\lambda_{\text{spv}(1962-1978)} = -0,03291 \cdot \text{DN} + 0,62525 \cdot \text{M} + 50,00144 \cdot \text{Tp} + 1,28402$	R= 0,86310 R <sup>2</sup> = 0,74495 Se = 0,99725
5	1979-1994	$\log\lambda_{\text{spv}(1979-1994)} = -0,04550 \cdot \text{DN} + 3,65622$	R= 0,87887 R <sup>2</sup> = 0,77242 Se = 0,96855
6	1995-2012	$\log\lambda_{\text{spv}(1995-2012)} = -0,050443 \cdot \text{DN} - 0,645707 \cdot \text{M} + 4,442355$	R= 0,90993 R <sup>2</sup> = 0,82797 Se = 0,73568

Otrzymane modele regresji cechują się bardzo dobrym dopasowaniem do obserwacji, współczynnik determinacji zawiera się w większości przypadków w przedziale od 74 do 83%. Tylko model dla przewodów wybudowanych w latach 1922 – 1938 posiada współczynnik determinacji wynoszący ok. 53%. Zmienna charakteryzująca wstrząsy górnicze, okazała się istotna tylko dla modelu zbudowanego dla przewodów wybudowanych w latach 1885 – 1920. Zgodnie z powyższym, można wnioskować, że najstarsze analizowane przewody, mogą być najmniej odporne na występujące wstrząsy górnicze. W przedstawionym modelu, istotną zmienną okazała się również wysokość ciśnienia w miejscu występowania awarii, co może również świadczyć o mniejszej odporności wyłącznie najstarszych przewodów na wymieniony czynnik. Dla przewodów zbudowanych w latach 1922 – 1938 i 1979 – 1994, wyłącznie średnica z wyrazem wolnym, wywierały istotny wpływ na intensywność uszkodzeń przewodów, co jest najprawdopodobniej skutkiem znaczących różnic w sposobie budowy/posadowienia przewodów poszczególnych średnic.

Dla pozostałych grup przewodów, analizowanych ze względu na czas ich budowy, parametrami istotnymi w tworzonych modelach okazały się: średnica i materiał przewodów, czas pracy bezuszkodzeniowej oraz wyraz wolny.

Przeprowadzona analiza reszt, dla każdego omówionego powyżej modelu regresji, wykazała, że spełnione są założenia analizy regresji w zakresie normalności reszt, liniowości modelu względem parametrów oraz homoscedastyczności dla modeli zbudowanych dla następujących zmiennych:  $\log\lambda_{\text{spvz}}$ ,  $\log\lambda_{\text{sv80}}$ ,  $\log\lambda_{\text{sv100}}$ ,  $\log\lambda_{\text{sv150}}$ ,  $\log\lambda_{\text{sv100s}}$ ,  $\log\lambda_{\text{sv100z}}$ ,  $\log\lambda_{\text{sv150s}}$ . W przypadku pozostałych modeli warunki o liniowości modelu względem parametrów oraz o homoscedastyczności nie zostały spełnione. Na otrzymanych wykresach rozrzutu widoczne są dwie grupy punktów, ze względu na dużą rozbieżność pomiędzy wartościami intensywności uszkodzeń sieci wodociągowej i przyłączy. Opisana sytuacja świadczy o niejednorodności próby losowej, przyjętej do analizy i może wpływać na jakość otrzymywanych modeli. Nie zmienia to jednak faktu, że wartości współczynników determinacji otrzymanych w przedmiotowych modelach, ze względu na większą liczbę danych przy uwzględnianiu całej grupy przewodów, przyjmują dobre wartości. Zgodnie z powyższym uzasadnione wydaje się przeprowadzenie podobnej analizy indywidualnie dla przewodów sieci wodociągowej i przyłączy.

## 5. Podsumowanie i wnioski

Przedstawione w artykule analizy, stanowią pierwszą tego rodzaju próbę, wyznaczenia wpływu wstrząsów górniczych na intensywność uszkodzeń przewodów podsystemu dystrybucji wody.

Przeprowadzone badania opierały się wyłącznie na danych historycznych otrzymanych z obiektu rzeczywistego, co uniemożliwiło powtórzenie i eliminację pewnych błędów pomiaru. Należy również podkreślić, że badania obejmowały teren całej gminy o powierzchni 69,44 km<sup>2</sup>. Powoduje to możliwość występowania wielu dodatkowych, nie uwzględnionych/niezidentyfikowanych w przeprowadzonych badaniach czynników, które mogły wpływać na zmienne zależne a zatem także, na jakość otrzymywanych modeli.

Analizy przedstawione w artykule pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

1. Zmienna niezależna ( $PGV_{Hmax}$ ) informująca o wpływie wstrząsów górniczych na intensywność uszkodzeń przewodów podsystemu dystrybucji wody, okazała się istotna w zbudowanych modelach regresji dla wybranych grup przewodów podsystemu dystrybucji wody. Wskazuje to na istnienie nieuwzględnianego do tej pory czynnika wpływającego na awaryjność przewodów wodociągowych, zlokalizowanych na terenach górniczych podatnych na tąpnięcia.
2. Zmienną niezależną, która w większości zbudowanych modeli regresji posiadała największy wpływ na zmienną zależną okazała się średnica przewodów (9 z 15 modeli) oraz kolejno czas pracy bezuszkodzeniowej (7 z 15 modeli) oraz  $PGV_{Hmax}$  i materiał z którego wykonane są przewody (po 5 z 15 modeli).
3. Opracowana w pracy metodyka analizy i oceny wpływu wstrząsów górniczych na intensywność uszkodzeń przewodów podsystemu dystrybucji wody, może zostać zastosowana dla każdego podsystemu dystrybucji wody oraz innych ciśnieniowych, liniowych obiektów podziemnych tj. sieci ciepłownicze, gazowe, kanalizacja ciśnieniowa, zlokalizowanych na terenach oddziaływania wstrząsów górniczych, pod warunkiem, że dostępne będą dane dotyczące: awaryjności obiektów liniowych, klasy gruntów, na których zlokalizowane są obiekty, wartości energii wstrząsów, współrzędnych epicentrum wstrząsów oraz postaci modeli rozprzestrzeniania się fali drgań gruntu w rozpatrywanym rejonie lub w przypadku braku takich modeli - wartości  $PGV_{Hmax}$ , jak również współrzędnych stanowisk pomiarowych i typu gruntu, na którym są one zlokalizowane.
4. Opracowane modele regresji mogą stanowić podstawę do opracowania programu komputerowego, który mógłby posłużyć do prognozowania awarii przewodów podsystemu dystrybucji wody po wstrząsie górniczym, o określonych parametrach np. bazując na prognozie wstrząsów górniczych, podczas rozpoczynania eksploatacji w nowym polu wydobywczym.

## Literatura

1. Atkinson G. M., Boor D. M., Earthquake ground-motion prediction equation for Western North America, Bulletin of the Seismological Society of America 2006; 96: 2181-2205, <https://doi.org/10.1785/0120050245>.
2. Bańka P., Kołodziejczyk P., Lier E., Wykorzystanie wyników pomiarów parametrów drgań gruntu do wyznaczenia wartości współczynnika amplifikacji drgań, Przegląd Górniczy 2016, 4 (1121): 71-79.
3. Boron P., Dulińska J., The dynamic analysis of a steel pipeline under a seismic shock, Procedia Engineering 2017, 199: 104 – 109, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.166>.



4. Bouziou D., O'Rourke T. D., Response of the Christchurch water distribution system to the 22 February 2011 earthquake, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2017, 97: 14 – 24, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.01.035>.
5. Bubińska A. M., El Shafie A. H., Jaafar O., Performance improvement for pipe breakage prediction modeling using regression method, *International Journal of the Physical Sciences* 2011, 25 (6): 6025 – 6035, <http://www.academicjournals.org/journal/IJPS/article-full-text-pdf/F7B3D0625658>.
6. Chodacki J., New ground motion prediction equation for peak ground velocity and duration of ground motion for mining tremors in Upper Silesia, *Acta Geophysica* 2016, 64 (6): 2449 – 2470, <http://agp.igf.edu.pl/files/64/6/Chodacki.pdf>.
7. Clark R., Deininger R.A., Protecting the nation's critical infrastructure: the vulnerability of U.S. water supply systems, *Journal of Contingencies and Crisis Management* 2000, 8 (2): 73–80, doi: 10.1111/1468-5973.00126.
8. Council Directive 2008/114/EC of 8 December 2008 on the identification and designation of European critical infrastructures and the assessment of the need to improve their protection, *Official Journal of the European Union* JOL\_2008\_345\_R\_0075\_01.
9. Cubillo F., Pérez P., Water distribution system risk assessment method, *Procedia Engineering* 2014, 89: 355-362, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.199>.
10. Dubiński J., Mutke G., Tataro T., Muszyński L., Barański A., Kowal T., Zasady stosowania zweryfikowanej górniczej skali intensywności drgań GSIGZWKW-2012 do prognozy i oceny skutków oddziaływania wstrząsów indukowanych eksploatacją złóż węgla kamiennego w zakładach górniczych Kompanii Węglowej S. A. na obiekty budowlane i na ludzi, 2013 – instrukcja.
11. Dulińska J., Oddziaływanie drgań powierzchniowych wywołanych wstrząsami górniczymi w rejonie GZW I LGOM na konstrukcję gazociągu, *Wstrząsy górnicze – charakterystyka parametrów drgań oraz kryteria oceny wpływu na obiekty budowlane*, Główny Instytut Górnictwa, Katowice, 2010.
12. Dulinska J.M., Jasinska D., Performance of Steel Pipeline with Concrete Coating (Modeled with Concrete Damage Plasticity) under Seismic Wave Passage, *Applied Mechanics and Materials* 2014, 459: 608-613, <doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.459.608>.
13. EN 1998 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance.
14. Esposito S., Iervolino I.; PGA and PGV Spatial Correlation Models Based on European Multievent Datasets, *Bulletin of the Seismological Society of America* 2011, 101 (5): 2532-2541, <https://doi.org/10.1785/0120110117>.
15. Farmania R., Kakoudakis K., Behzadian K., Butler D., Pipe failure prediction in water distribution systems considering static and dynamic factors; *Procedia Engineering* 2017, 186: 117-126, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.217>.
16. Frej A., Zuberek W. M., Local effects in peak accelerations caused by mining tremors in bytom syncline region (Upper Silesia), *Acta Geodynamica et Geomaterialia* 2008, 5 (2): 115–122, [https://www.irsm.cas.cz/materialy/acta\\_content/2008\\_02/3\\_Frej.pdf](https://www.irsm.cas.cz/materialy/acta_content/2008_02/3_Frej.pdf).
17. Gangl G., Fuchs-Hanusch D., Stadlober E., Kauch P.; Analysis of the failure behaviour of drinking water pipelines; *Water Science and Technology: Water Supply* 2007, 7 (5-6): 219-225, doi: 10.2166/wst.2011.507.
18. Golik, A. Mendecki, M., Ground-motion prediction equations for induced seismicity in the main anticline and main syncline, Upper Silesian Coal Basin, Poland 2012, 60 ( 2): 410 – 425, <https://doi.org/10.2478/s11600-011-0070-9>.

19. Hamdala .F. K., Sagar G. Y., Statistical analysis of pipe breaks in water distribution systems in Ethiopia, the case of Hawassa, IOSR Journal of Mathematics 2016; 12 (3): 127 – 136, <http://www.iosrjournals.org/iosr-jm/papers/Vol12-issue3/Version-4/N120304127136.pdf>.
20. Hotłoś H., Ilościowa ocena wpływu wybranych czynników na parametry i koszty eksploatacji sieci wodociągowych, Wrocław, 2007.
21. Hotłoś H., Mielcarzewicz E., Metody oceny udziału szkód górniczych w uszkodzalności sieci wodociągowych, Materiały konferencyjne Rola GPW w systemie zaopatrzenia w wodę dziś i jutro, Górnośląskie Przedsiębiorstwo Wodociągów w Katowicach i PZiTS o/Katowice, Ustroń, 1997.
22. Hotłoś H., Mielcarzewicz E., Warunki i ocena niezawodności działania sieci wodociągowych i kanalizacyjnych na terenach górniczych, Monografia, Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2011.
23. Ioyama R., Ishida E., Yune K., Shirozu R, Seismic damage estimation procedure for water supply pipeline, Proceedings of the twelfth world conference on earthquake engineering 2000, 1762, <http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/1762.pdf>.
24. Joachim K., Kalisz P., 2010: Awarie sieci gazowych na terenach górniczych. Główny Instytut Górnictwa „Górnictwo i Środowisko”2010, 4(1): 95- 105.
25. Kalisz P., Stec K., 2016: Oddziaływanie wstrząsów górniczych na gazociągi, Przegląd Górniczy 2016, 72(10): 1 – 8, <http://www.sitg.pl/przegladgorniczny/spis-wydawniczy.html>
26. Kurzeja J., Estymacja czasu trwania drgań gruntu generowanych silnymi wstrząsami w kopalniach GZW, Przegląd Górniczy 2016, 7 (1124): 51 – 56.
27. Kurzeja J., Seismometric monitoring in the area of the Piekary Śląskie junction of the A1 motorway in terms of recording the vibrations resulting from mining tremors, Journal of Sustainable Mining 2017, 16: 14 – 23, <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2017.06.002>.
28. Kuś K. i inni, Podstawy projektowania układów i obiektów wodociągowych, Politechnika Śląska, Skrypt uczelniany nr 1854, Gliwice, 1995.
29. Kwietniewski M., Miszta-Kruk K., Piotrowska A., 2011: Wpływ temperatury wody w sieci wodociągowej na jej awaryjność w świetle eksploatacyjnych badań niezawodności, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Czasopismo Techniczne 1 – Ś/2011, 1 (108): 113-129.
30. Kwietniewski M., Rak J. Niezawodność infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w Polsce. Monografie Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Studia z Zakresu Inżynierii, 67, Warszawa 2010,
31. Kwietniewski M., Roman M., Kłoss-Trębaczekiewicz H.: Niezawodność wodociągów i kanalizacji. Arkady. Warszawa 1993
32. Lasocki, S. (2013), Site specific prediction equations for peak acceleration of ground motion due to earthquakes induced by underground mining in Legnica-Głogów Copper District in Poland, Acta Geophysica 2013, 61(5): 1130-1155, <https://doi.org/10.2478/s11600-013-0139-8>.
33. Lee D. H., Kim B. H., Lee H., Kong, J. S., 2009: Seismic behavior of a buried gas pipeline under earthquake excitations, Engineering Structures 2009, 31: 1011–1023, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.12.012>
34. Mahmoodian M., Aryai V., Structural failure assessment of buried steel water pipes subject to corrosive environment, Urban Water Journal 2017 14 ( 10): 1023 – 1030, <http://dx.doi.org/10.1080/1573062X.2017.1325500>.

35. Mora-Rodríguez J., Delgado - Galván X., Ramos H. M., López-Jiménez P. A., An overview of leaks and intrusion for different pipe materials and failures, *Urban Water Journal* 2014, 11 (1): 1-10, <http://dx.doi.org/10.1080/1573062X.2012.739630>.
36. O'Rourke, M. J., Ayala, G., Pipeline damage due to wave propagation, *Journal Geotechnical Engineering* 1993, 119: 1490–1498, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1993\)119:9\(1490\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1993)119:9(1490))
37. O'Rourke M. J., Liu X., Response of buried pipelines subject to earthquake effects, Monograph no. 3, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research 1999, 33–57.
38. O'Rourke T. D., Jung J. K., Argyrou C., Underground pipeline response to earthquake-induced ground deformation, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2016, 91: 272 – 283, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.09.008>
39. O'Rourke T. D., Toprak S., Sano Y., Factors Affecting Water Supply Damage Caused by the Northridge Earthquake, *Proceedings of 6th US National Conference on Earthquake Engineering* 1998: 1–12.
40. Pietrucha-Urbanik K, Studziński A., Case study of failure simulation of pipelines conducted in chosen water supply system. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2017; 19 (3): 317–323, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2017.3.1>.
41. Pilch R., Szybka J., Tuszyńska A., Application of factoring and time-space simulation methods for assessment of the reliability of water-pipe networks, *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2014; 16 (2): 253-258, <http://www.ein.org.pl/sites/default/files/2014-02-12.pdf>.
42. Pineda-Porras O., Ordaz M., A new seismic intensity parameter to estimate damage in buried pipeline due to seismic wave propagation, *Journal of Earthquake Engineering* 2007, 11: 773–786, <http://dx.doi.org/10.1080/13632460701242781>.
43. Rak J., *Bezpieczeństwo systemów zaopatrzenia w wodę*, Polska Akademia Nauk, Instytut Badań Systemowych, Warszawa 2009.
44. Rak J., *Wybrane aspekty bezpieczeństwa systemów wodociągowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej 2015.
45. Rak J., Tchurzevska-Cieślak B., Studziński A., Pietrucha-Urbanik K., Boryczko K., *Niezawodność i bezpieczeństwo systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2012.
46. Rezaei H., Ryan B., Stoianov I.; Pipe failure analysis and impact of dynamic hydraulic conditions in water supply networks; *Procedia Engineering* 2015, 119: 253 – 262, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.883>.
47. Scheidegger A, Leitão J P, Scholten L., Statistical failure models for water distribution pipes – A review from a unified perspective, *Water Research* 2015, 83: 237–247, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.06.027>.
48. Si H., Midorikava S., New attenuation relations for peak ground acceleration and velocity considering effects of faulty type and site condition, *Journal of structural and construction engineering* 1999, 64 (523): 63 – 70, [http://doi.org/10.3130/aijs.64.63\\_2](http://doi.org/10.3130/aijs.64.63_2).
49. Takada S. and Tanabe K., 1987: Three-dimensional seismic response analysis of buried continuous or jointed pipelines, *Journal of Pressure Vessel Technology* 1987, 109: 80–87, [doi:10.1115/1.3264859](https://doi.org/10.1115/1.3264859).
50. Ustawa z dnia 26 kwietnia 2007 r. o zarządzaniu kryzysowym. Dz. U. 2007 Nr 89 poz. 590 wraz z póź. zm.

51. Ustawa z dnia 7 czerwca 2001 r. o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzaniu ścieków Dz. U. 2017 poz. 328 wraz z póź. zm.
52. Wang, L. R.-L., Cheng, K.-M., Seismic response behavior of buried pipelines, Journal of Pressure Vessel Technology 1979, 101: 21–30, [doi:10.1115/1.3454594](https://doi.org/10.1115/1.3454594).
53. Wiczysty A.: Niezawodność systemów wodociągowych i kanalizacyjnych Cz. I i II, Teoria niezawodności i jej zastosowania, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1990.
54. Zasada działania rejestratora drgań AMAX-GSI, Instrukcja obsługi, Dokumentacja techniczno - ruchowa, Laboratorium Sejsmologii i sejsmiki górniczej.
55. Zembaty Z., Rockburst induced ground motion – a comparative study, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 2004, 24 (1): 11 – 23, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2003.10.001>.