

# Analiza awaryjności sieci wodociągowej w świetle rozkładu ciągłych deformacji powierzchni terenu w czasie

## Pipelines' failure analysis in the light of space-time distribution of ground deformation



*Dr inż. hab. Ryszard Hejmanowski  
prof. AGH<sup>\*)</sup>*



*Dr inż. Agnieszka Malinowska<sup>\*)</sup>*



*Mgr inż. Michał Szadziul<sup>\*)</sup>*

**Treść:** Przewidywanie miejsc newralgicznych z punktu widzenia zagrożenia awariami wywołanymi przez deformacje powierzchni jest niezwykle utrudnione. Prognozy deformacji wykonywane są przede wszystkim dla głównych rurociągów magistralnych, a także rurociągów o specjalnym znaczeniu. Ich wyniki skłaniają często do przeskalowania nakładów na działania profilaktyczne w rurociągach. Autorzy postawili w artykule pytanie o możliwość globalnej oceny zagrożenia uszkodzeniami całej sieci w danym rejonie. Taka globalna analiza wykonywana w fazie prognozy deformacji pozwalałaby na wskazanie odcinków sieci, na których należy skoncentrować działania profilaktyczne przed i w trakcie prowadzenia projektowanej eksploatacji górniczej. Można by docelowo wdrożyć zasady oceny zagrożenia sieci pozwalające na optymalizację ryzyka inwestycyjnego.

**Abstract:** Pipelines network in the mining areas consist of pipes of different ages and different material structure. Before mining the technical condition of the pipelines is unknown. So prediction of the hazard of the damage caused by mining is extremely difficult. In general, protection of the pipelines is reduced to the fixing of damaged parts of the pipelines. Surface deformation prognosis are primarily done for the major pipelines and pipelines of special meaning. The results of the prognosis often tend to overestimate the prevention effort in protection of the pipelines. The authors made an attempt to answer the questions about the possibility of the global damage hazard estimation in the whole pipeline network. The aim of the global analysis is the indication of network segments which need to be protected or reinforced during mining operation. There is a chance of implementing the principles of the pipeline risk assessment in optimization of the investment risk.

### **Słowa kluczowe:**

*uszkodzenia wodociągów, dynamika ciągłych deformacji powierzchni terenu, ocena zagrożenia*

### **Key words:**

*Pipelines' failure, dynamics of the ground deformation, hazard assessment*

## **1. Wprowadzenie**

Awaryjność sieci wodociągowych, gazowych i innych tego typu obiektów infrastruktury technicznej jest problemem istotnym szczególnie na terenach intensywnej, wieloletniej działalności górniczej i zróżnicowanego wieku oraz typów stosowanych rur. Od lat na terenach Górnego Śląska dyskutowane są możliwości zabezpieczania i monitorowania sieci wodociągowej [2-8]. Analizowane są przypadki większych awarii, zawsze w kontekście wieku, materiałów, stanu danego odcinka sieci wodociągowej oraz wielokrotnych wpływów eksploatacji górniczej [7, 10, 11]. Wydaje się, że problematyka ta znalazła swoje miejsce w świadomości zarówno gmin

górniczych, jak i przedsiębiorców, z tym że jak dotąd nie ma sformułowanych ogólnych zasad oceny zagrożenia tego typu obiektów. Klasyczne podejście polegające na określeniu odporności odcinkowej rurociągu i zestawienie jej z kategorią terenu nie jest dobre, gdyż prowadzi do bądź przeinwestowania sieci (nadmiernych zabezpieczeń), bądź skazania jej na liczne awarie. Problem awaryjności sieci wodociągowych i gazowych dotyczy wszystkich zakładów prowadzących podziemną eksploatację górniczą [5].

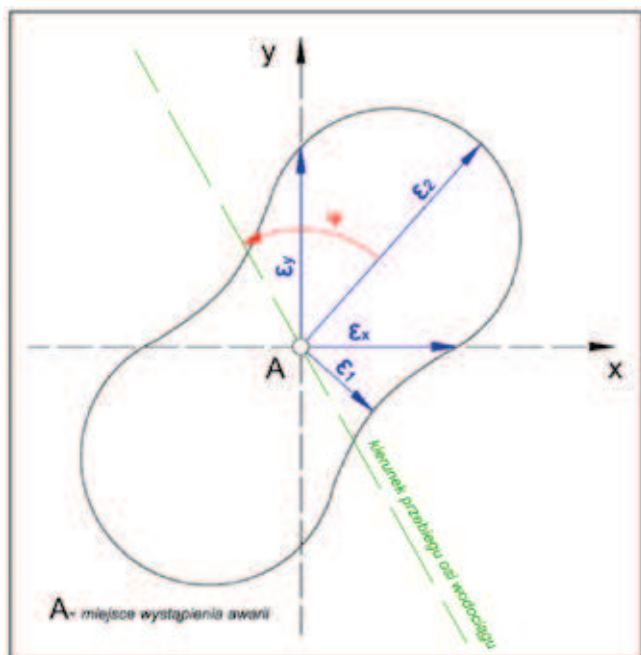
Jeśli wiadomo, że tego typu obiekty liniowe szczególnie czule są na deformacje podłużne i skręcenia, przyjęło się wyznaczać prognozowane wartości wskaźników deformacji wzdłuż osi rurociągu, a dodatkowo czasami także kierunek odkształceń głównych. Badania kilkudziesięciu przypadków awarii z rejonów eksploatacji zawałowej wskazują jednak,

<sup>\*)</sup> AGH w Krakowie

że można skuteczniej prognozować zagrożenia rurociągów, bazując na ocenie wskaźników proponowanych w niniejszym artykule. Dzięki temu można by podjąć opracowanie procedury prognozowania zagrożeń rurociągów na terenach górniczych, która pozwoli na identyfikację rejonów możliwych uszkodzeń. Wdrożenie tej procedury mogłoby się przyczynić do optymalnego stosowania zabezpieczeń profilaktycznych oraz lepszej identyfikacji rejonów zagrożonych awariami celem poddania ich bieżącemu nadzorowi.

## 2. Metodyka badań obiektów liniowych z uwzględnieniem postulatów dotyczących czasoprzestrzennego rozkładu wskaźników deformacji

Analiza materiałów empirycznych z terenów eksploatacji zawalowej węgla kamiennego oraz rozmów z firmami zarządzającymi sieciami wodociągowymi pozwoliła na sformułowanie metodyki badań i ich realizację [9]. Zaproponowano wiele wielkości prognozowanych, które mogłyby stanowić wskaźniki świadczące o zagrożeniu. Następnie podjęto próbę oceny korelacji tych wielkości z uszkodzeniami i awariami sieci, które faktycznie wystąpiły. Dla celów analizy zgromadzono próbę przypadków uszkodzeń i awarii zarejestrowanych przez zarządcę sieci wodociągowej w rejonie eksploatacji węgla kamiennego. Zarówno sieć i jej forma oraz typy rur, jak i eksploatacja górnicza mogą być uznane za standardowe dla terenów Górnego Śląska. Analizie podlegała sieć standardowa składająca się z odcinków stalowych, PCV oraz azbestowych i żeliwnych. Nie rozgraniczono typologicznie typów rur i przyporządkowanych im uszkodzeń, przyjmując założenie o globalnej ocenie zagrożeń. Założenie to znajduje uzasadnienie, jeśli weźmie się pod uwagę częsty brak wiedzy zarządzających sieciami na temat budowy wielu historycznych odcinków, aż do czasu wystąpienia awarii i odsłonięcia uszkodzonego odcinka. Nie negując wyników dotychczasowych badań z tego zakresu stwierdzono na wstępie, że istotne znaczenie dla szkodliwego wpływu eksploatacji na rurociągi ma czasowa zmienność wskaźników deformacji. Założenie to stanowiło podstawę przyjętej metodologii badań.



Rys. 1. Geometryczna definicja kąta  $\psi$  na tle rozkładu odkształceń głównych

Fig. 1. Main horizontal strains and angle  $\psi$

Badania opierały się na analizie wpływu na powstanie uszkodzenia w obiekcie liniowym następujących czynników:

- czasowego rozkładu odkształcenia kierunkowego, osiowego  $\epsilon_{\alpha}$ , mm/m,
- czasowego rozkładu odkształceń głównych  $\epsilon_{g1}$ , mm/m,  $\epsilon_{g2}$ , mm/m w miejscu powstania awarii,
- odkształcenia maksymalnego  $\epsilon_{max}$ , mm/m, które wystąpiło w miejscu powstania awarii,
- kąta oddziaływań odkształceń poziomych czasowo ekstremalnych  $\psi$ , [°], definiowanego jako kąt zawarty pomiędzy osią danego obiektu liniowego a kierunkiem maksymalnych głównych odkształceń poziomych oddziaływujących na ten obiekt (rys. 1). Zmienność kąta  $\psi$  była analizowana w ujęciu czasowym.

## 3. Analiza awaryjności sieci wodociągowej w świetle czasowego rozkładu wskaźników deformacji

Badania oparte zostały na populacji 71 awarii, które wystąpiły w sieci wodociągowej o długości 62 km, przebiegającej przez tereny poddane wpływom eksploatacji górniczej. Średnica wodociągów wahała się w granicach 40-200 mm. Materiał, z którego wykonana została sieć wodociągowa to głównie stal (około 80 % przypadków). W badanej populacji występowały również obiekty azbestowe (15%), PE (3%), żeliwne (2%). Głębokość posadowienia rur to około 1.1 metra (73%). Ciśnienie wody w sieci wynosiło od 0.38 MPa do 0.50 MPa. Grunt, w którym przebiegała analizowana sieć wodociągowa był głównie mokry (68% przypadków) lub nawodniony (28%), bardzo nawodniony (4%).

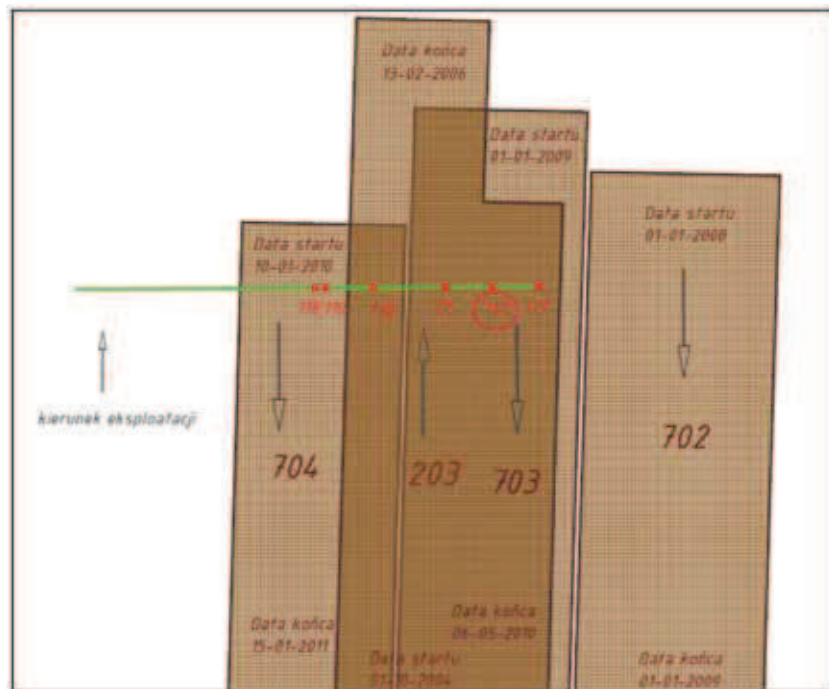
Analiza zależności pomiędzy prognozowanymi deformacjami powierzchni terenu a miejscem stwierdzenia awarii realizowana była dla trzech wariantów lokalizacji rur wodociągowych w stosunku do kierunku frontu eksploatacji: prostopadłe, diagonalne oraz równoległe. Przedstawiono dyskusję uzyskanych wyników dla dwóch podstawowych położeń w stosunku do eksploatacji górniczej.

Należy jednak wyraźnie podkreślić, że przedstawione analizy dotyczą poligonu badawczego i konkretnej eksploatacji górniczej. Maksymalne wartości wskaźników deformacji zaprezentowane w badaniach są słuszne dla badanej populacji. W przypadku terenów poddanych bardziej intensywnej eksploatacji wartości wskaźników deformacji mogą znacznie wzrosnąć.

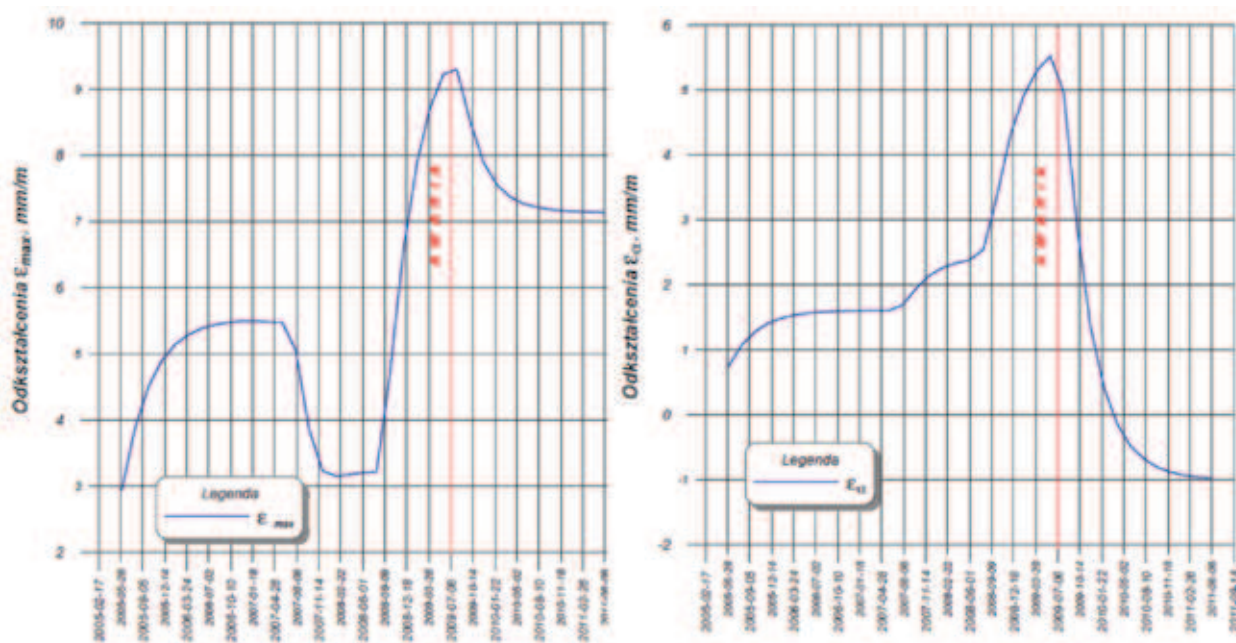
### 3.1. Układ prostopadły

Na rysunku 2 przedstawiono układ frontów eksploatacji, która wywołała awarie sieci wodociągowej (odcinków prostopadłych do wybiegu ścian). Linia zieloną zaznaczono kierunek przykładowego rurociągu wraz z uszkodzeniami (czerwone punkty).

Analiza prognozowanych wskaźników deformacji została przeprowadzona ilościowo i jakościowo dla wszystkich lokalizacji awarii zarejestrowanych w trakcie eksploatacji. Utworzona baza danych zawierała 29 przypadków uszkodzeń i awarii. Dla ilustracji zaprezentowano wykresy rozkładu wskaźników dla awarii nr 113 (rys. 3, 4, 5). Awaria ta, jak można sądzić po analizie rezultatów badań, została spowodowana przekroczeniem wytrzymałości wywołanym przez odkształcenie osiowe, zbieżne co do momentu wystąpienia z ekstremalnym odkształceniem głównym (rys. 3). Odkształcenia główne (ściskające) wykazywały w okresie wystąpienia awarii największy przyrost dochodzący do 3 mm/m. W żadnym innym momencie eksploatacji ta amplituda pomiędzy wartościami odkształcenia maksymalnego a minimalnego nie osiągała tak znacznych wartości (rys. 4).

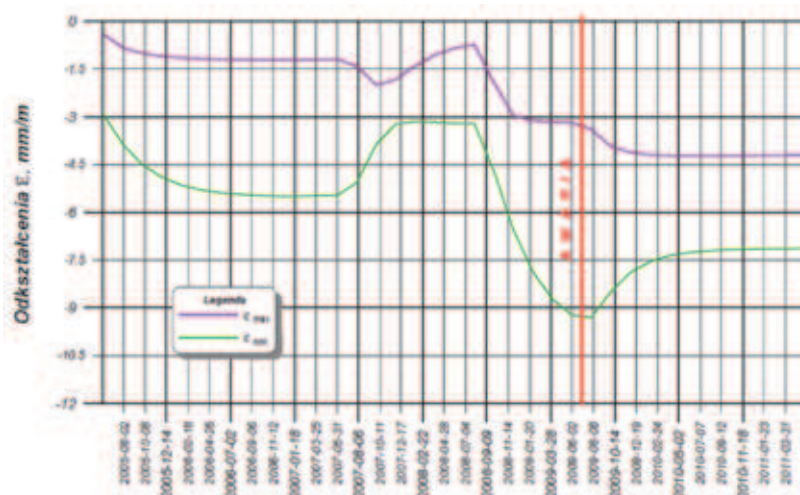


Rys. 2. Awaryjność wodociągu znajdującego się w układzie prostokątnym względem kierunku prowadzonej eksploatacji  
 Fig. 2. Distribution of failures in water supply pipeline vs. mining exploitation (water supply pipeline perpendicular to exploitation)

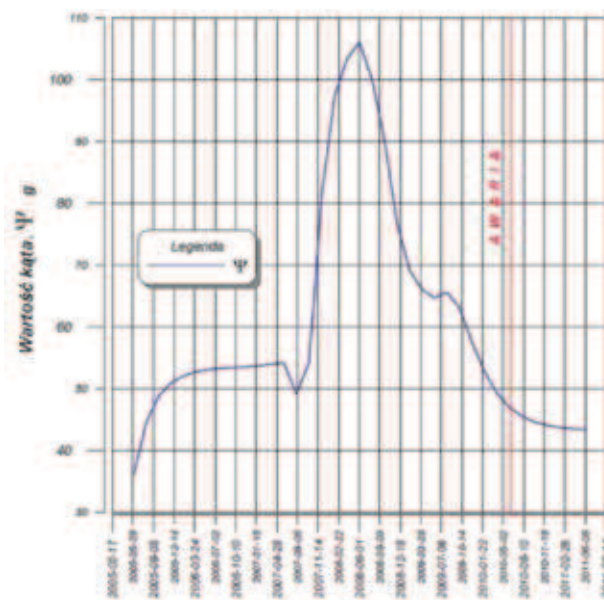


Rys. 3. Rozkład odkształceń maksymalnych a) i kierunkowych b) w czasie  
 Fig. 3. Distribution of the maximal horizontal strain a) and directional horizontal strain b) over time





Rys. 4. Rozkład odkształceń głównych w czasie  
Fig. 4. Distribution of the major horizontal strain over time



Rys. 5. Zmiany kąta  $\psi$  w czasie  
Fig. 5. Distribution of the angle  $\psi$  over time

Można zauważyć, że wskaźnik kątowy wykazywał w momencie wystąpienia awarii wartości minimalne, biorąc pod uwagę zakres wartości, które przyjmował w okresie przedmiotowej eksploatacji (rys. 5).

W całej populacji analizowanych awarii w kontekście eksploatacji frontem prostopadłym można dokonać oceny liczności wystąpień awarii w zależności od danego wskaźnika deformacji. Biorąc pod uwagę odkształcenia główne (rys. 6), można mówić o istotnej zależności liczby występujących awarii od wartości bezwzględnych odkształceń głównych.

Wartości odkształceń osiowych, ale dopiero w granicach 4-6 mm/m, miały istotny wpływ na uszkodzenia rurociągów zarówno w strefie ściskania, jak i rozciągania (rys. 7).

Wpływ kąta oddziaływań odkształceń poziomych czasowo ekstremalnych zaznaczył się w najliczniejszej liczbie awarii w rejonie wartości 40°-80° (rys. 8).

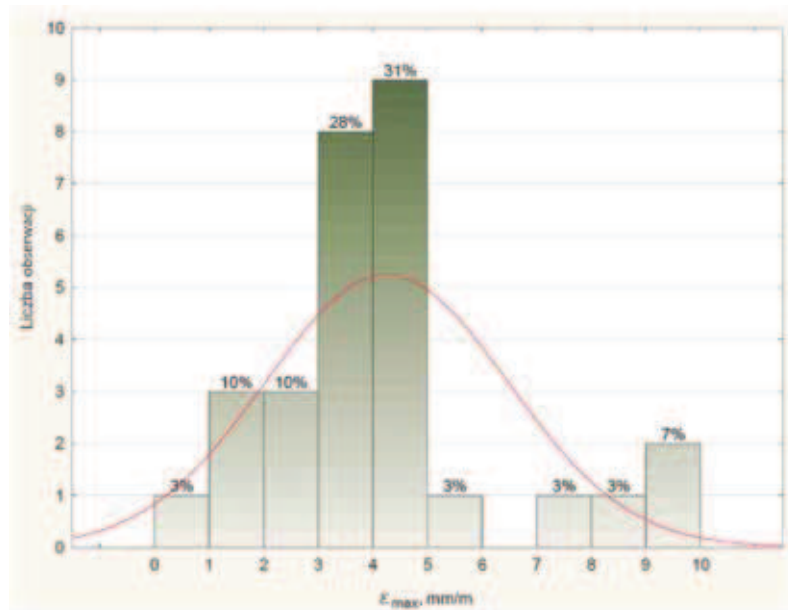
### 3.2. Awaryjność wodociągu znajdującego się w układzie równoległym względem kierunku prowadzonej eksploatacji

Przypadek eksploatacji górniczej o wybiegu równoległym do odcinków sieci wodociągowej, analizowano w odniesieniu do bazy 42 uszkodzeń i awarii. Przykładowy odcinek sieci na tle ścian eksploatacyjnych pokazano na rysunku 9.

Zależność czasu wystąpienia przykładowej awarii nr 81 w zależności od kształtowania się wartości wskaźników deformacji zaprezentowano na rysunkach 10, 11, 12, 13. Analiza tego przypadku wskazuje na brak wpływu poziomych odkształceń osiowych na uszkodzenie rurociągu. Prawdopodobnie zakres kompensacji na odcinkach upodmiotowionych rurociągu był wystarczający do przeniesienia poziomych odkształceń ściskających w zakresie od -1 mm/m do -7 mm/m (rys. 10).

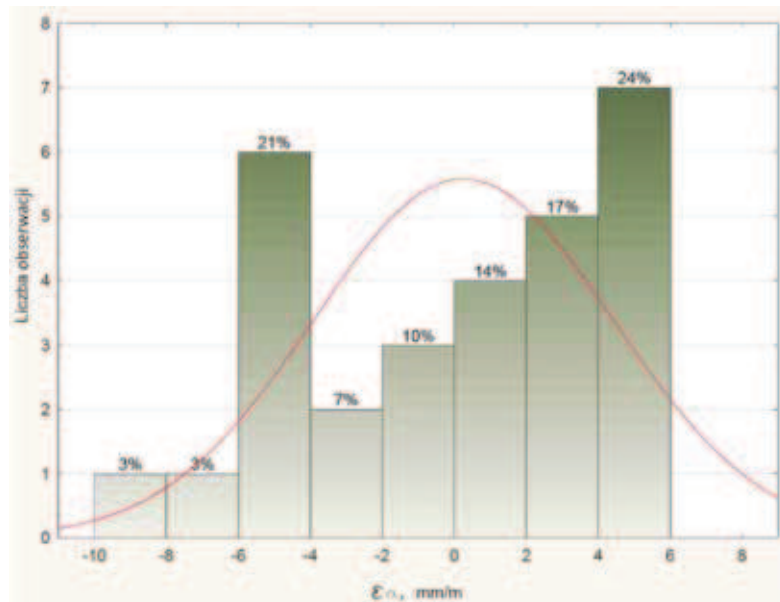
Rys. 6. Liczność awarii w zależności do wartości maksymalnych odkształceń poziomych

Fig. 6. Relation between the number of failures and the maximal horizontal strain



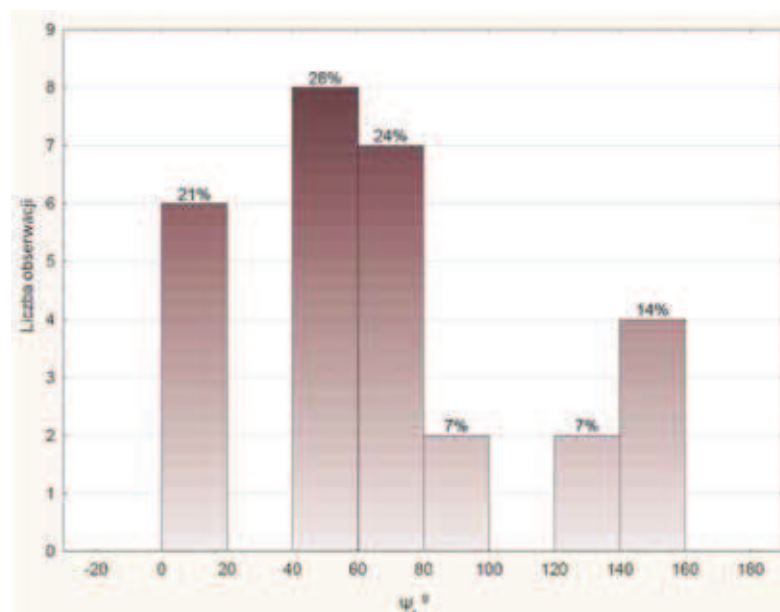
Rys. 7. Liczność awarii w zależności do wartości kierunkowych odkształceń poziomych

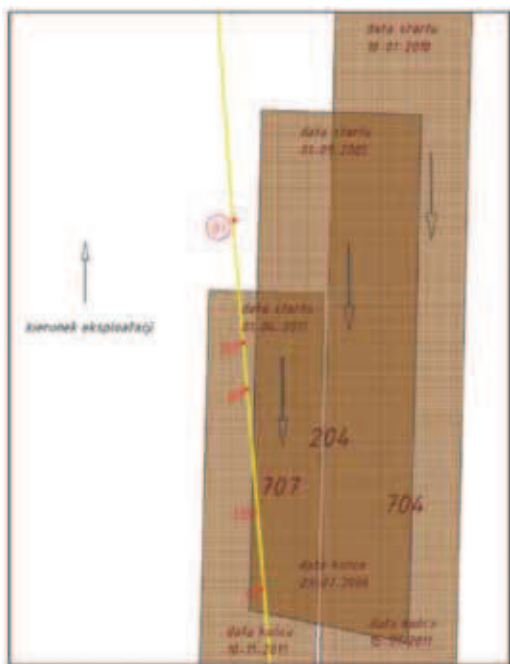
Fig. 7. Relation between the number of failures and the directional horizontal strain



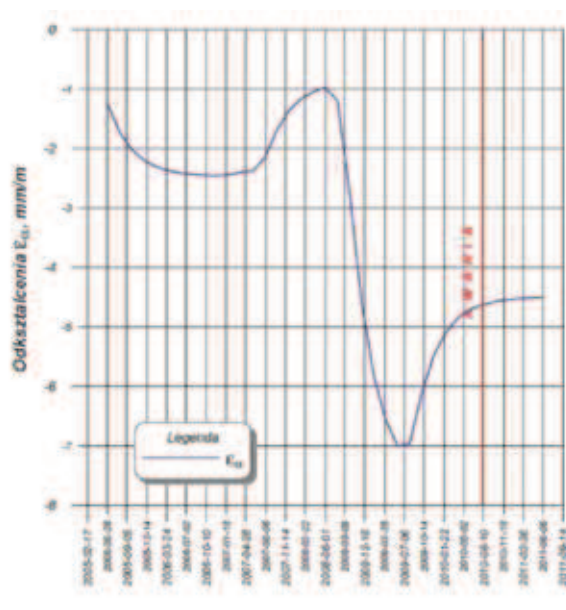
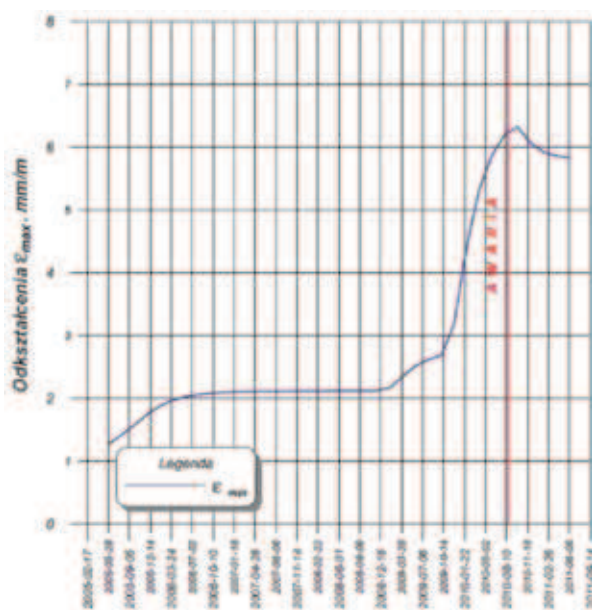
Rys. 8. Liczność awarii w zależności od kąta oddziaływania maksymalnych odkształceń poziomych

Fig. 8. Relation between the number of failures and the angle of maximal horizontal strain

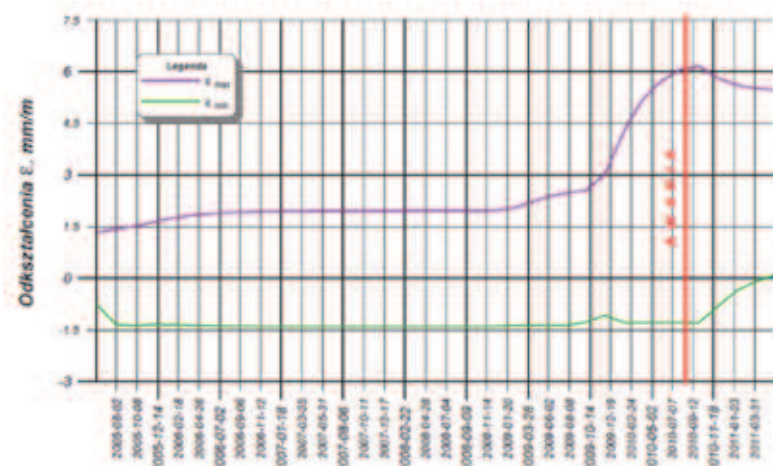




Rys. 9. Awaryjność wodociągu znajdującego się w układzie równoległym względem kierunku prowadzonej eksploatacji  
 Fig. 9. Pipeline failure – parallel location of the pipeline to the direction of the exploitation



Rys. 10. Rozkład odkształceń maksymalnych a) i kierunkowych b) w czasie  
 Fig. 10. Distribution of the maximal horizontal strain a) and directional horizontal strain b) over time



Rys. 11. Rozkład odkształceń głównych w czasie  
 Fig. 11. Distribution of the major horizontal strain over time



Wyraźnie na czas wystąpienia awarii miały jednak wpływ wartości poziomych odkształceń głównych, które dochodziły do +6 mm/m (rys.10). Zatem wytrzymałość na rozciągania badanego odcinka sieci były mniejsze niż na ściskania. Interesująco przedstawia się wpływ amplitudy ekstremalnych czasowo poziomych odkształceń głównych (rys. 11). Awaria wystąpiła w momencie oddziaływań odpowiadających maksymalnym przyrostom tych odkształceń. Podobnie jak w przypadku prostopadłego usytuowania frontu eksploatacji wskaźnik ten ma istotny wpływ na wystąpienie awarii.

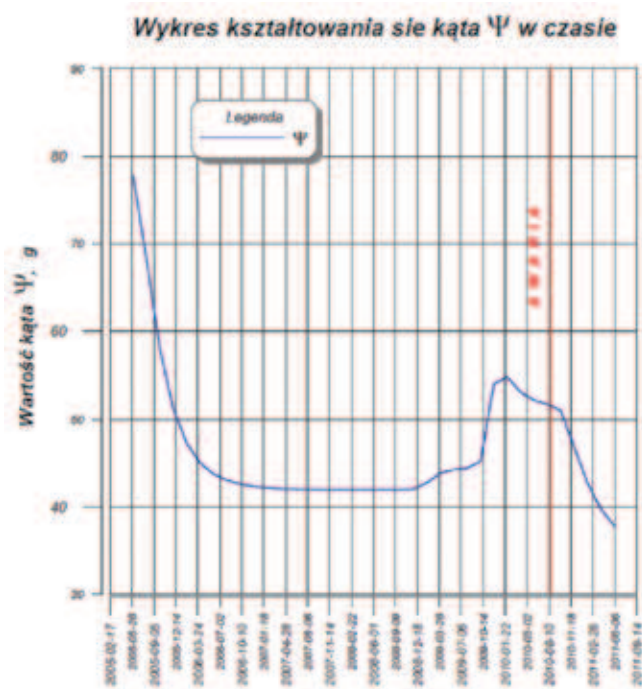
Wskaźnik kątowych oddziaływań w okresie wystąpienia awarii 81 przyjął wartość w granicach 50g (rys. 12).

Analizy licznosci występowania uszkodzeń w zależności od wartości poszczególnych, przyjętych do analizy wskaźników deformacji wskazują na mniej istotne zależności niż w przypadku frontu prostopadłego. Zależność liczby awarii sieci w układzie równoległym od bezwzględnych wartości odkształceń głównych wskazuje na istotne znaczenie tego wskaźnika powyżej wartości ok. 3 mm/m (rys. 13). Potwierdza to spostrzeżenia zanotowane dla układu prostopadłego.

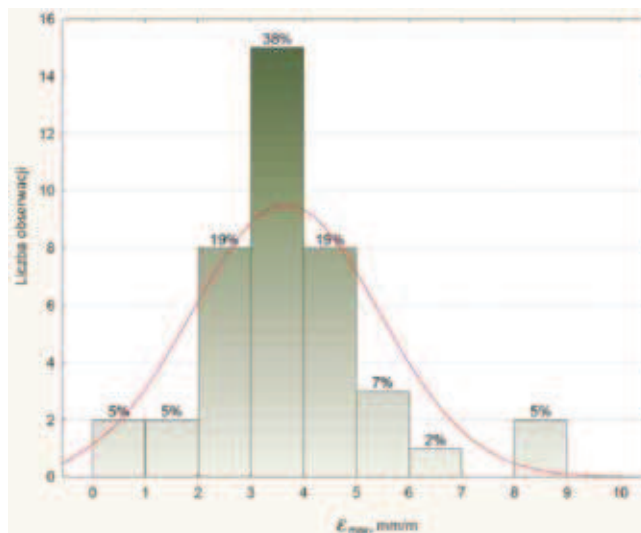
Liczność przypadków awarii w stosunku do wartości odkształceń poziomych, osiowych wskazuje na istotną zależność w zakresie - 3 mm/m do +4 mm/m (rys. 14). Wyraźny skok licznosci awarii w zakresie 0 mm/m do +1 mm/m wynika zapewne z tego, że w strefie niewielkich wartości odkształceń osiowych, odkształcenia poprzeczne przyjmują zazwyczaj wartości maksymalne, prowadząc do wzrostu naprężeń radialnych. Potwierdzeniem tej tezy może być wykres zależności licznosci występowania awarii w zależności od wskaźnika kąтового (rys. 15). Istotne liczby awarii występują w tym przypadku przy kątach od 0° do ok. 120°.

**5. Podsumowanie**

Zaprezentowane wyniki badań bazują na analizie uszkodzeń i awarii sieci wodociągowej zlokalizowanej na terenie górniczym jednej z górnośląskich kopalń węgla kamiennego.

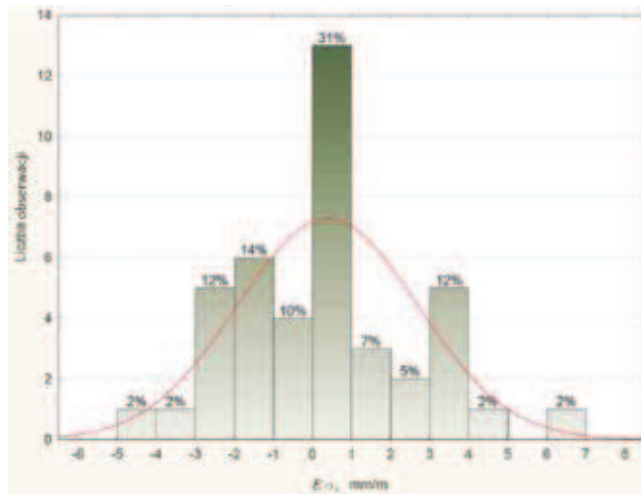


Rys. 12. Zmiany kąta  $\psi$  w czasie  
Fig. 12. Distribution of the angle  $\psi$  over time



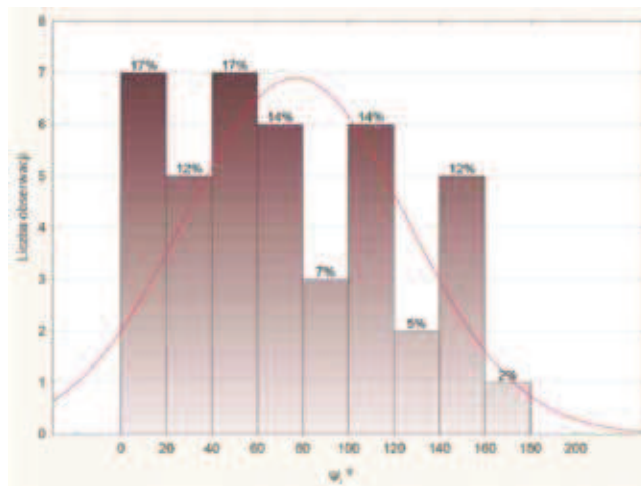
Rys. 13. Licznosc awarii w zależności do wartości maksymalnych odkształceń poziomych

Fig. 13. Relation between the number of failures and the maximal horizontal strain



Rys. 14. Licznosc awarii w zależności do wartości kierunkowych odkształceń poziomych

Fig. 14. Relation between the number of failures and the directional horizontal strain



Rys. 15. Licznosc awarii w zależności od kąta oddziaływania maksymalnych odkształceń poziomych

Fig. 15. Relation between the number of failures and the angle of maximal horizontal strain

Standardowe warunki zarówno typów rur, jak i eksploatacji górniczej pozwalają na uogólnienia, które powinny odpowiadać innym rejonom na terenach górniczych kopalń węgla kamiennego na Górnym Śląsku. W artykule zaprezentowano część wyników obszerniejszej analizy statystycznej na próbie kilkudziesięciu przypadków awarii sieci.

Analizy uwzględniały zmienność w czasie oddziaływań deformacji na poszczególne odcinki sieci wodociągowej. Często zdarza się, że rurociągi poddawane są zwiększonym naprężeniom jedynie w stosunkowo krótkim okresie, na stosunkowo krótkich odcinkach. Stwierdzono, że w takich okresach występują skumulowane awarie, występujące na danym odcinku wielokrotnie. W prognozach deformacji dla sieci wodociągowych należałoby te okresy wykazywać i uwzględniać w ocenie zagrożenia.

Spośród zaproponowanych w części metodologicznej wskaźników deformacji najistotniejszą rolę można przypisać bezwzględny wartościom odkształceń głównych oraz przyrostom tych odkształceń. Wydaje się bowiem, że uszkodzenie występuje często wówczas, gdy naprężeniom ekstremalnym (dla danej eksploatacji) w jednym kierunku towarzyszą odkształcenia ekstremalne w kierunkach prostopadłych. Cytowane w artykule przypadki awarii stanowią potwierdzenie tego faktu.

Wskaźnik kątowy przy największych awariach wskazywał na istotną przewagę wpływu naprężeń osiowych na rury, jednak analizy liczności wskazały na występowanie awarii w pełnym zakresie zmienności kąta, od kierunku 0° do ponad 80°. Może to świadczyć o istotnym wpływie skreń na licznosc występujących awarii. Ten aspekt podlega obecnie badaniom, po zakończeniu których możliwe będzie uogólnienie metodyki oceny zagrożenia sieci wodociągowych (i innych) na terenach górniczych.

Należy podkreślić, że celem prezentowanych badań było przeanalizowanie możliwości prowadzenia globalnej oceny zagrożenia sieci wodociągowych na etapie prognozy deformacji ciągłych, w oparciu o wyselekcjonowane wskaźniki deformacji. Wydaje się, że przytoczone rezultaty badań w dużej mierze potwierdziły takie możliwości.

## Afiliacja

***Niniejsze badania zostały sfinansowane przez Narodowe Centrum Badań, nr grantu 2011/01/D/ST10/06958.***

## Literatura

1. *Figiel W.*: Aspekty geotechniczne badań doświadczalnych na terenach górniczych dla wyznaczenia współczynnika tarcia rurociągu i gruntu. *Geotechnika i budownictwo specjalne*: Wydawnictwo KGBiG AGH, 2006, p. 227–236.
2. *Kalisz P.*: Probabilistyczna analiza wpływu eksploatacji górniczej na rurociągi. „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, S. Górnictwo” 2005, vol. 270, p. 109-118.
3. *Kalisz P.*: Wpływ eksploatacji górniczej na studzienki kanalizacyjne z tworzyw sztucznych. „Przeгляд Górnicy” 2005, nr 7.
4. *Kalisz P.*: Wpływ eksploatacji górniczej na niezawodność przewodów wodociągowych. „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, S. Górnictwo” 2007, vol. 278, p. 191-200.
5. *Kowalski A., Kwiatek J.*: Ochrona powierzchni i obiektów budowlanych na terenach górniczych. „Przeгляд Górnicy” 1995, nr 4.
6. *Kwiatek J., Mokrosz R.*: Sieci gazowe na terenach górniczych. WUG, 1996, vol. 3.
7. *Mendec J., Kliszczewicz B., Wytrychowska M.*: Ochrona powierzchni i obiektów budowlanych przed uszkodzeniami górniczymi. Zasady ochrony sieci wodociągowej i kanalizacyjnej przed wpływami podziemnej eksploatacji górniczej. Wyd. GiG, Katowice 1997.
8. *Mokrosz R.*: Wpływ deformacji podłoża górniczego na zagłębione w nim rurociągi.
9. *Szadziul M.*: Analiza zagrożenia sieci wodociągowej na terenach górniczych. Praca magisterska, niepublikowana, 2013.
10. *Talesnick M., Baker R.*: Failure of flexible pipe with a concrete liner. „Engineering Failure Analysis” 2008, Vol. 5, No. 3, p. 247-259.
11. *Zhao W., Nassar R., Hall D.*: Design and reliability of pipeline rehabilitation liners. „Tunneling and Underground Space Technology” 2005, No. 20, p. 203-212.