POLITECHNIKA ŚLĄSKA
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA

Rada Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport

OGRANICZENIE AWARII INFRASTRUKTURY TECHNICZNEJ ODPADÓW POFLOTACYJNYCH Z FLOTACJI RUDY MIEDZI W KGHM POLSKA MIEDŹ S.A.

IWONA DUSZYŃSKA

Promotor: prof. dr hab. inż. Joanna Bzówka

Gliwice, 2025

SPIS TREŚCI

1.	**WPROWADZENIE ……**		**5**
	1.1.	Ruda miedzi w KGHM Polska Miedź S.A. ……..	5
	1.2.	Hydrotransport odpadów poflotacyjnych na Obiekt Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych OUOW Żelazny Most ……	7
2.	**STUDIUM LITERATURY ……**		**13**
	2.1.	Hydrotransport odpadów i regulacje prawne z nim związane ……..……	13
	2.2.	Charakterystyka hydrotransportu ……..…	21
	2.3.	Wybrane przykłady dużych instalacji hydrotransportu ……	25
	2.4.	Wybrane przykłady awarii infrastruktury technicznej …….	26
	2.5.	Metody wykrywania awarii …….…….	37
	2.6.	Wykorzystanie metody elementów skończonych MES do analizy awarii ……...	47
	2.7.	Wykorzystanie sztucznej inteligencji do wykrywania wycieków ……	49
3.	**PRZEGLĄD AWARII INFRASTRUKTURY TECHNICZNEJ ODPADÓW POFLOTACYJNYCH W LATACH 2018÷2023 ……..**		**51**
	3.1.	Zestawienie awarii rurociągu odpadów poflotacyjnych R1 ……	51
	3.2.	Zestawienie awarii rurociągu odpadów poflotacyjnych R2 ……	53
	3.3.	Zestawienie awarii rurociągu odpadów poflotacyjnych R3 ……..	55
	3.4.	Zestawienie awarii rurociągów odpadów poflotacyjnych A2 i A1 …….	58
	3.5.	Zestawienie awarii Lubińskich rurociągów odpadów poflotacyjnych L0, L1, L2 i L3 ……	58
	3.6.	Zestawienie awarii rurociągów odpadów poflotacyjnych i instalacji technologicznej w Pompowni ZWR Rudna ……	60
	3.7.	Zestawienie awarii rurociągów odpadów poflotacyjnych i instalacji technologicznej w Pompowni ZWR Polkowice ……	63
	3.8.	Zestawienie awarii rurociągów odpadów poflotacyjnych i instalacji technologicznej w Pompowni ZWR Lubin …….	63
	3.9.	Zestawienie awarii rurociągów odpadów poflotacyjnych w rejonach węzłów zlokalizowanych wokół OUOW Żelazny Most ……	66
	3.10.	Zestawienie awarii rurociągu technologicznego wody przemysłowej RW1…….	67
	3.11.	Zestawienie awarii rurociągu technologicznego wody przemysłowej RW2 ……	69
	3.12.	Zestawienie awarii rurociągu technologicznego wody przemysłowej RW4 ……	71
	3.13.	Zestawienie awarii Lubińskiego rurociągu technologicznego wody przemysłowej na trasie od OUOW Żelazny Most do ZWR Lubin …….	72
	3.14.	Zestawienie awarii rurociągów technologicznych wody przemysłowej na Pompowni Kalinówka …….	74
	3.15.	Zestawienie awarii Odrzańskich rurociągów technologicznych wody przemysłowej …….	75

4.	**ANALIZA I PODSUMOWANIE PRZYCZYN AWARII ……**		**79**
	4.1.	Analiza ryzyka powstania awarii infrastruktury technicznej rurociągów …….	79
	4.2.	Analiza przyczyn awarii infrastruktury technicznej odpadów poflotacyjnych w latach 2018÷2023 ……..	85
5.	**BADANIA TERENOWE I LABORATORYJNE INFRASTRUKTURY TECHNICZNEJ ODPADÓW POFLOTACYJNYCH ……..**		**89**
	5.1.	Metoda obserwacyjna jakościowa ……	92
	5.2.	Badania ultradźwiękowe ……..	102
	5.3.	Badania wytrzymałościowe ……..	120
6.	**ANALIZY NUMERYCZNE ……..**		**139**
	6.1.	Wpływ prędkości ubytku grubości ścianek rury na czas uszkodzenia rurociągu ……..	141
	6.2.	Wpływ zmienności prędkości ubytku ścianek rury na czas osiągnięcia granicznej wartości wytrzymałości ……...	142
	6.3.	Wpływ zmienności ciśnienia mieszaniny w rurociągu na czas osiągnięcia granicznej wartości wytrzymałości ……	146
	6.4.	Wpływ zmienności gęstości mieszaniny na czas osiągnięcia granicznej wartości wytrzymałości ……..	149
	6.5.	Analiza wyników badań ……	152
7.	**PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE ……**		**155**
	PODZIĘKOWANIA ……..……..		**171**
	BIBLIOGRAFIA ……		**173**
	STRESZCZENIE ……		**181**
	SUMMARY ……		**183**
	ZAŁĄCZNIKI …… Z.1. Wykaz zarejestrowanych zdarzeń o znamionach awarii i/lub poważnej awarii w latach 2019÷2023 Z.2. Mapa lokalizacji awarii na sieci hydrotransportu odpadów poflotacyjnych rudy miedzi Z.3. Zestawienie Tablic opracowanych dla wdrożenia rozwiązań technicznych w celu ograniczenia awarii infrastruktury technicznej odpadów poflotacyjnych z flotacji rudy miedzi w KGHM Polska Miedź S.A.		**185**

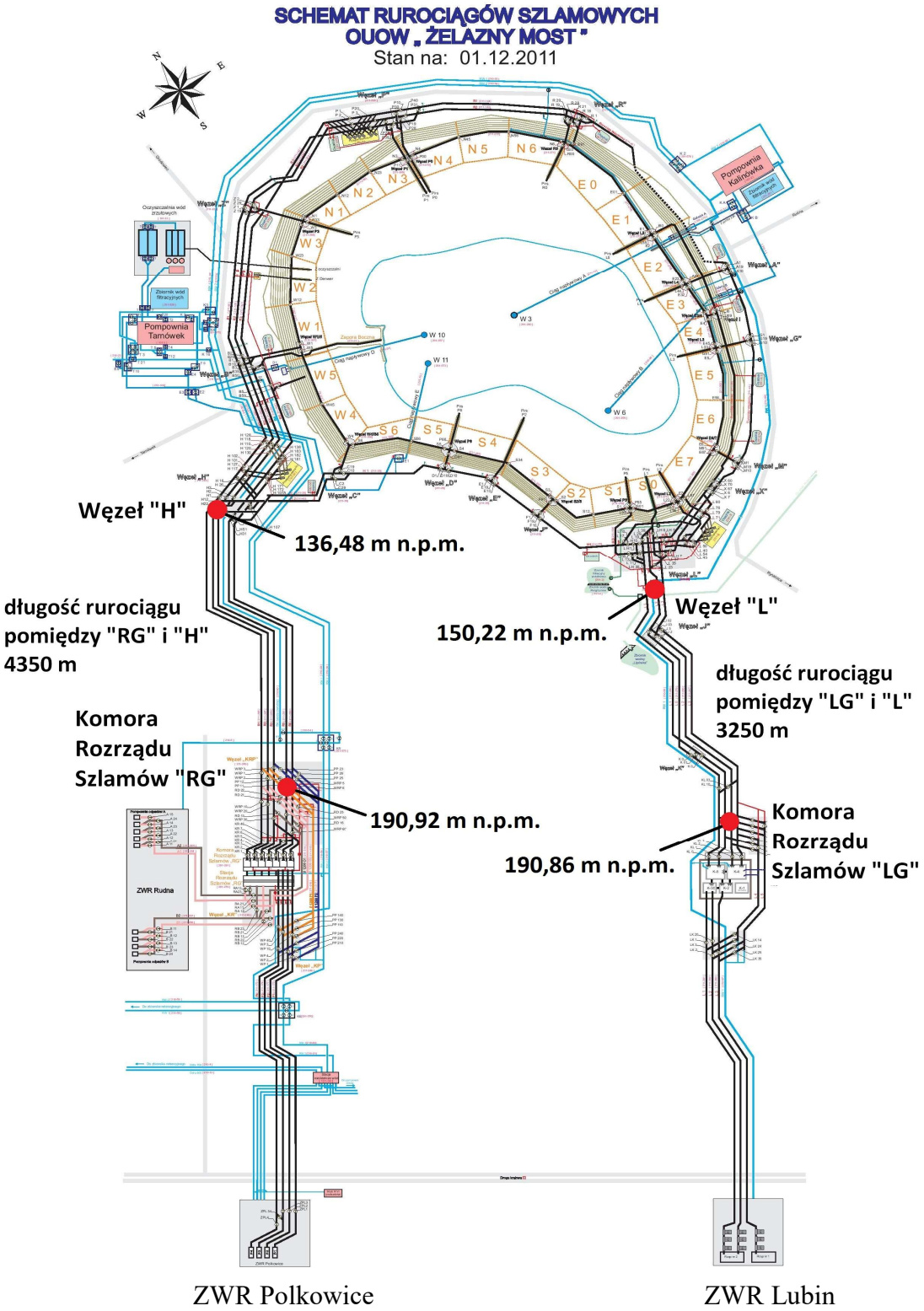
1. WPROWADZENIE

1.1. Ruda miedzi w KGHM Polska Miedź S.A.

Oddział - Zakład Hydrotechniczny (O/ZH) jest bardzo istotnym ogniwem w ciągu technologicznym Kombinatu Górniczo-Hutniczego KGHM Polska Miedź S.A. Oddział O/ZH przyjmuje odpady z flotacji rud miedzi oraz tłoczy oczyszczoną wodę technologiczną na potrzeby produkcyjne Zakładów Wzbogacania Rud (ZWR). Bezawaryjność infrastruktury technicznej tego Oddziału ma duży wpływ na produkcję poszczególnych Oddziałów Zakładów Wzbogacania Rud, na pracę Zakładów Górniczych, jak również na aspekt środowiskowy i ekonomiczny.

W kopalniach podziemnych KGHM Polska Miedź S.A. w Polsce, ruda miedzi zawiera do 2,66 % czystej miedzi wydobywanej na powierzchnię poprzez szyby wydobywcze, która jest następnie przekazywana do Zakładów Wzbogacania Rud, zlokalizowanych głównie przy szybach kopalń. W procesie wzbogacania flotacji w ZWR otrzymuje się koncentrat miedzi na poziomie do 26%, który przetwarza się w hutach na czystą miedź i srebro. Pozostała część urobku, o niewielkiej już zawartości metalu, na poziomie Cu od 0,1% do 0,3% , Ag w ilości od kilku do kilkunastu g/t oraz innych metali szlachetnych i kolorowych, stanowiąca odpad, jest przesyłana siecią rurociągów na Obiekt Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych OUOW Żelazny Most (Rys. 1.1). Odpady poflotacyjne w postaci uwodnionej są przesyłane rurociągami na długości ok. 250 km metodą hydrotransportu. Przepompowuje się ponad 80 tys. m^3/dobę fazy stałej odpadów poflotacyjnych. Odpady stałe pozostają na obiekcie OUOW Żelazny Most, a woda po sklarowaniu zostaje zawrócona do ponownego wykorzystania w Zakładach Wzbogacania Rud. Ewentualna nadwyżka wody po oczyszczeniu jest zrzucana do rzeki Odry. Obecnie obiekt OUOW Żelazny Most ma pojemność ok. 700 mln m^3, natomiast istnieje możliwość zwiększenia jego pojemności do ponad 1,1 miliarda m^3. Aktualnie uruchomiono Stację Zagęszczania Odpadów SZO składającą się z zagęszczaczy, która częściowo, w ilości ok. 25% dopływającego medium do OUOW Żelazny Most, zagęszcza odpady do wartości gęstości objętościowej 1,50 Mg/m^3, a następnie rurociągami technologicznymi zrzuca zagęszczony odpad poflotacyjny na wybudowaną nową Kwaterę Południową, zlokalizowaną w południowej części OUOW Żelazny Most.

Schemat poglądowy infrastruktury technicznej Obiektu Unieszkodliwiana Odpadów Wydobywczych OUOW Żelazny Most jest pokazany na rysunku 1.1.



Rys. 1.1. Schemat poglądowy infrastruktury technicznej Obiektu Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych OUOW Żelazny Most (Archiwum KGHM Polska Miedź S.A., 2011)

1.2. Hydrotransport odpadów poflotacyjnych na Obiekt Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych OUOW Żelazny Most

Wydobycie rudy miedzi i jej przetworzenie na czysty metal, czyli miedź, generuje szereg problemów technicznych na każdym etapie produkcji, tj. od wydobycia poprzez przeróbki, które odbywają się w trzech Zakładach Wzbogacania Rud (ZWR), aż do zrzutów odpadów poflotacyjnych, powstających w procesie wzbogacania rudy miedzi. Odpad poflotacyjny powstały w procesie flotacji (Matis i Mavros, 1991; Kyzas i in., 2021) jest codziennie transportowany do Zakładu Wzbogacania Rud rurociągami technologicznymi kierowanymi na Obiekt Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych (OUOW) Żelazny Most (Rys. 1.1÷1.3; Fot. 1.1÷1.3).

Wysokość zapór Obiektu Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych OUOW Żelazny Most co roku zwiększa się. Aktualna wysokość rzędnej wynosi 195,00 m n.p.m. Odpady poflotacyjne tłoczy się ciśnieniowo z poszczególnych Zakładów Wzbogacania Rud (ZWR) do poszczególnych pompowni, zlokalizowanych u podnóża OUOW Żelazny Most, poprzez Pompownię Odpadów „H" znajdującą się na wysokości rzędnej 136,48 m n.p.m., a następnie do Pompowni Północnej usytuowanej na rzędnej 170,00 m n.p.m. do Obiektu OUOW Żelazny Most. Obecnie funkcjonują trzy Zakłady Wzbogacania Rud, tj. ZWR Lubin, zlokalizowany na rzędnej 185,00 m n.p.m., ZWR Rudna, zlokalizowany na rzędnej 175,00 m n.p.m. oraz ZWR Polkowice zlokalizowany na rzędnej 154,80 m n.p.m.

Odpady poflotacyjne są materiałem ziarnistym powstałym ze zmielonych, rozkruszonych skał płonnych, piasków, iłów oraz innych surowców skalnych. Hydrotransport odpadów poflotacyjnych na trasie z Zakładu Wzbogacania Rud na Obiekt Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych OUOW Żelazny Most przebiega ciśnieniowo rurociągami magistralnymi, o średnicach nominalnych od 800 do 1000 mm, na łącznej długości ok. L=250 km, przyczyniając się do szybkiej ścieralności, tzw. abrazji instalacji technologicznej (Czaban i in., 2007; Czaban i Pratkowiecki, 2007; Wee i Yap, 2019).

Fot. 1.1. Widok na Obiekt Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych OUOW Żelazny Most (Archiwum KGHM O/ZH, 2020)

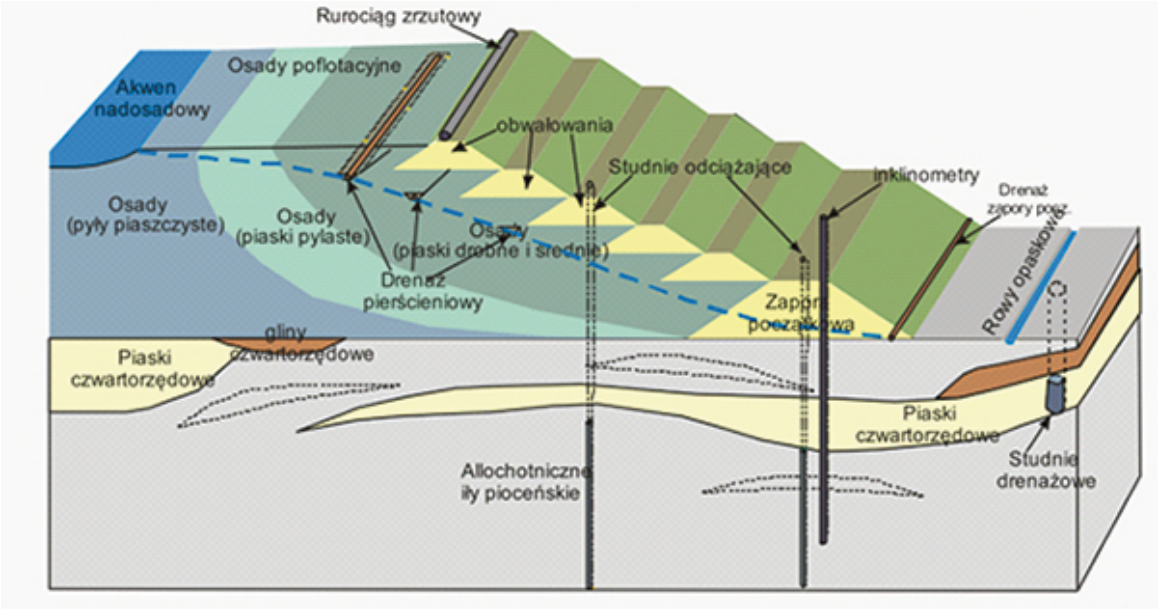
Rys. 1.2. Widok na Obiekt Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych OUOW Żelazny Most i Kwaterę Południową (www.bing.com/images/search)

Fot. 1.2. Widok na Kwaterę Południową przy Obiekcie Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych OUOW Żelazny Most (www.bing.com/images/search)

Fot. 1.3. Widok na Obiekt Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych OUOW Żelazny Most i Kwaterę Południową (www.bing.com/images/search)

Efektem wydobycia rud miedzi są odpady kopalniane, które są sklasyfikowane w zależności od uziarnienia. Wyróżnia się odpady drobnoziarniste, często nazywane szlamami oraz grubsze odpady skalne (Tschuschke, 2006).

Przekrój poprzeczny przez składowisko odpadów poflotacyjnych na Obiekcie Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych OUOW Żelazny Most jest przedstawiony na rysunku 1.3.



Rys. 1.3. Przekrój poprzeczny przez składowisko odpadów poflotacyjnych na Obiekcie Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych OUOW Żelazny Most (www.bing.com/images/search)

W sieciach przesyłowych występuje zjawisko ścieralności rurociągów oraz armatury technologicznej, w tym zasuw, kompensatorów stalowych i części zamiennych do pomp, powodując konieczność wymiany rurociągów i armatury technologicznej.

Głównymi kierunkami działania w pracy doktorskiej są badania instalacji hydrotransportu odpadów poflotacyjnych z rudy miedzi. Badania i analizy prowadzone w ramach pracy doktorskiej powinny przyczynić się do zapobiegania licznym awariom infrastruktury technicznej, a tym samym do ograniczenia kosztów ponoszonych na pilne naprawy, jak również do opracowania rozwiązań technicznych, które można wdrożyć w KGHM Polska Miedź S.A., aby zapobiec zagrożeniom, które przyczyniają się do powstawania awarii.

Bazując na doświadczeniu zawodowym Autorki rozprawy można wyróżnić następujące przyczyny awarii rurociągów instalacji technologicznej:

- dynamiczne skoki ciśnienia przepływających przez rurociągi odpadów poflotacyjnych,
- przemieszczenia rurociągów w wyniku powstania momentów zginających, jak również sił pionowych powodujących wyboczenie ścianek rurociągu,
- użycie niewłaściwego materiału (złej jakości stali) do produkcji rurociągów,
- lokalne zmniejszenie grubości ścianek rurociągu, spowodowane korozją materiału,
- defekty połączeń rurociągów, w tym m.in. rozerwania szwów, pęknięcia spawów,
- gwałtowne i niepożądane zjawisko kawitacji, które powoduje lokalne zawirowania szlamu wskutek pofałdowania powierzchni,
- zwiększona liczba łuków na załamaniach trasy rurociągu,
- niewłaściwie, tj. niezgodne ze sztuką inżynierską wykonane połączenia rurociągów.

Celem pracy doktorskiej jest ograniczenie awarii infrastruktury technicznej odpadów poflotacyjnych z flotacji rudy miedzi w KGHM Polska Miedź S.A. Aby ten cel osiągnąć, rozpoczęto od zestawienia awarii rurociągów przesyłowych, magistralnych i armatury technologicznej, które wydarzyły się w latach 2018÷2023 na Obiekcie Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych OUOW Żelazny Most, jak również przedstawiono propozycje rozwiązań zapobiegających awariom i ograniczających koszty, jakie ponosi KGHM Polska Miedź S.A. w celu ich usunięcia. We wnioskach końcowych, po przeanalizowaniu zestawionych przyczyn awarii, sposobów ich usunięcia, jak również po analizie numerycznej, która wspomogła proces interpretacji przyczyn awarii, przedstawiono rozwiązania techniczne, które powinny w znaczący sposób ograniczyć stan awaryjny infrastruktury technicznej w KGHM Polska Miedź S.A.

2. STUDIUM LITERATURY

W rozdziale 2 dokonano przeglądu literatury dotyczącej tematyki hydrotransportu odpadów oraz związanych z tym zagadnieniem awarii infrastruktury technicznej. Przedstawiono definicje hydrotransportu, jak również podstawowe akta prawne dotyczące odpadów, w tym odpadów wydobywczych.

Przedstawiono dostępne metody wykrywania awarii na sieci technologicznej oraz możliwości wykorzystywania metody elementów skończonych MES, jak również sztucznej inteligencji na potrzeby zapobiegania awariom w hydrotransporcie.

2.1. Hydrotransport odpadów i regulacje prawne z nim związane

Hydrotransport odpadów, inaczej nazywany transportem hydraulicznym, to proces przenoszenia niejednorodnych, różno-frakcyjnych mieszanin materiałów sypkich bezpośrednio w strumieniu cieczy nośnej, jakim jest woda, z różnymi substancjami chemicznymi lub związkami organicznymi w rurociągach, kanałach, korytach sztucznych, w rzekach (Gosztowit, 1956; Dunikowski i in., 1976; Kęska, 1981; Palarski, 1982; Sobota i Kril, 1994).

Materiałem transportowanym w instalacjach technologicznych są głównie iły, skruszone skały płonne, różnego rodzaju węgiel, rudy, surowce skalne, piaski, a także odpady przemysłu hutniczego, chemicznego, odpady z elektrowni, gospodarstw rolnych, itp. (Palarski, 1982).

Hydrotransport odpadów znajduje duże zastosowanie w wielu branżach, m.in.: w górnictwie podziemnym i odkrywkowym, podczas wzbogacania kopalin, w przemyśle chemicznym, przy oczyszczaniu ścieków, oraz podczas transportu odpadów medycznych i weterynaryjnych (Dunikowski i in., 1976).

Badania naukowe obejmujące hydrotransport dotyczą fizykomechanicznych właściwości hydromieszanin, ich przepływu w rurach i kanałach, jak również instalacji, czyli badań ścieralności rur i pomp, ustalania zasad procesu wymiany rur, armatury w instalacjach oraz modelowania pracy instalacji (Kęska, 1977, 1981; Palarski, 1982; Zarzycki i Wilk, 1994; Jewell i Fourie, 2000; Paterson, 2011; Tschuschke i in., 2015).

Na układ technologiczny hydrotransportu mieszanin składają się następujące elementy (Dunikowski i in., 1976):

- zespół mieszająco-korekcyjny – składający się ze zbiorników, rząpi, obiektów pojemnościowych, w których utrzymywana jest mieszanina ciała stałego i wody. Poszczególne zawartości stężenia tych mieszanin tworzą mieszaninę jednorodną bądź niejednorodną (Gosztowit 1956),
- zespół wytwarzania różnicy ciśnień – realizowany przez zespół pompowy, jako ciśnieniowy bądź grawitacyjnie, jako różnica w wysokości między punktem początkowym a miejscem wylotu (zrzutu) mieszaniny z rurociągu,
- zespół przesyłowy – rurociągi, koryta, itp.,
- zespół odbioru mieszaniny – składowiska, zwałowiska, itp.,
- zespół oczyszczający wodę – pełniący funkcję oddzielenia ciała stałego od wody, wykorzystując znane metody hydrauliczne, mechaniczne lub chemiczne,
- zespół doprowadzający wodę – stacje pomp lub układy grawitacyjne pełniące rolę doprowadzania wody w określonej ilości i czasie do układu hydrotransportu,
- zespół sterowania wodą – zbiornik wyrównawczy, urządzenia zapewniające możliwość doprowadzenia określonej ilości wody do zespołu mieszająco-korygującego i zespołu wytwarzającego różnicę ciśnień,
- zespół pomiaru parametrów pracy układu – zbiór czujników pomiarowych, m.in. do pomiaru ciśnienia prędkości przepływu, zawartości ciała stałego i temperatury,
- zespół kontroli pracy układu hydrotransportu – stanowi funkcję kontroli prawidłowej pracy układu na podstawie pomiaru parametrów pracy przez porównanie z modelem pracy danego układu,
- zespół sterowania pracą układu – spełniający zadania regulacji określonego parametru zgodnie z otrzymanym sygnałem, m.in. zespół regulacji prędkości przepływu, zawartości ciała stałego, temperatury, rozruchu i zatrzymania układu hydrotransportu.

Mieszaniny transportowane rurociągami zostały sklasyfikowane w następujący sposób (Dunikowski i in., 1976, Matras 2001; Concha 2014):

a) mieszaniny jednorodne - o jednorodnej koncentracji, wykazujące właściwości nienewtonowskie przy wysokich koncentracjach, dzielące się na:
   - zawiesiny – bez osadu podczas spoczynku,
   - zawiesiny dynamiczne nienewtonowskie – bardzo niskie prędkości osadzania,

- zawiesiny dynamiczne newtonowskie – niskie prędkości osadzania,

b) mieszaniny niejednorodne - o niejednorodnym rozkładzie koncentracji z burzliwym lub przejściowym osadem ziaren, bez pojawienia się własności newtonowskich:
   - zawiesiny niejednorodne - bez wpływu warunków dennych,
   - zawiesiny o przepływie ziaren z odbijaniem lub wleczeniem - bez wpływu warunków dennych,
   - zawiesiny o przepływie w warunkach częściowo zamulonego dna rurociągu.

Do przepisów prawnych, które dotyczą odpadów i transportu hydraulicznego tych odpadów, należą m.in.:
- Ustawa z dnia 7 lipca 1994 roku Prawo budowlane (Dz.U. 2024, poz. 725; Dz. U. 2025, poz. 418),
- Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 roku Prawo ochrony środowiska (Dz.U.2001, nr 62, poz. 627),
- Ustawa z dnia 10 lipca 2008 roku o odpadach wydobywczych (Dz.U. 2022, poz. 2336),
- Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 roku o odpadach (Dz.U. 2023, poz. 1587, 1599, 1688, 1852, 2029),
- Ustawa z dnia 20 lipca 2017 roku Prawo wodne (Dz.U. 2017, poz. 1566),
- Rozporządzenie Ministra Klimatu z dnia 2 stycznia 2020 roku w sprawie katalogu odpadów (Dz.U. 2020, poz. 10).

Dyrektywy unijne, które zawierają przepisy dotyczące odpadów są następujące:
- Dyrektywa 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2000 roku ustanawiająca ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej,
- Dyrektywa 2004/35/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 21 kwietnia 2004 roku w sprawie odpowiedzialności za środowisko w odniesieniu do zapobiegania i zaradzania szkodom wyrządzonym środowisku naturalnemu,
- Dyrektywa 2006/12/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 5 kwietnia 2006 roku w sprawie odpadów,
- Dyrektywa 2008/98/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 19 listopada 2008 roku w sprawie odpadów oraz uchylająca niektóre dyrektywy,

- Dyrektywa 2010/75/UE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 24 listopada 2010 roku w sprawie emisji przemysłowych (zintegrowane zapobieganie zanieczyszczeniom i ich kontrole).

Ustawa z dnia 7 lipca 1994 roku Prawo budowlane (Dz.U. 2024, poz. 725; Dz.U. 2025, poz. 418) w Rozdziale 1 w art. 3 podaje następujące definicje:

- *„**budowla** – każdy obiekt budowlany niebędący budynkiem lub obiektem małej architektury, jak: obiekty liniowe, lotniska, mosty, wiadukty, estakady, tunele, przepusty, sieci techniczne, wolno stojące maszty antenowe, wolno stojące trwale związane z gruntem tablice reklamowe i urządzenia reklamowe, budowle ziemne, obronne (fortyfikacje), ochronne, **hydrotechniczne**, zbiorniki, **wolno stojące instalacje przemysłowe lub urządzenia techniczne**, **oczyszczalnie ścieków**, **składowiska odpadów**, stacje uzdatniania wody, konstrukcje oporowe, nadziemne i podziemne przejścia dla pieszych, sieci uzbrojenia terenu, budowle sportowe, cmentarze, pomniki, a także części budowlane urządzeń technicznych (kotłów, pieców przemysłowych, elektrowni jądrowych, elektrowni wiatrowych, morskich turbin wiatrowych i innych urządzeń) oraz fundamenty pod maszyny i urządzenia, jako odrębne pod względem technicznym części przedmiotów składających się na całość użytkową;*
- ***obiekt liniowy** – obiekt budowlany, którego charakterystycznym parametrem jest długość, w szczególności droga wraz ze zjazdami, droga kolejowa, **wodociąg, kanał**, gazociąg, ciepłociąg, **rurociąg**, linia i trakcja elektroenergetyczna, linia kablowa nadziemna*

i, umieszczona bezpośrednio w ziemi, podziemna, wał przeciwpowodziowy oraz kanalizacja kablowa, przy czym kable zainstalowane w kanalizacji kablowej, kable zainstalowane

w kanale technologicznym oraz kable telekomunikacyjne dowieszone do już istniejącej linii kablowej nadziemnej nie stanowią obiektu budowlanego lub jego części ani urządzenia budowlanego (...)”.

Zapisy Ustawy z dnia 27 kwietnia 2001 roku Prawo ochrony środowiska (Dz.U.2001, nr 62, poz. 627) zawierają definicje m.in. instalacji, poważnej awarii i poważnej awarii przemysłowej:

- *„**instalacja** to:*

a) stacjonarne urządzenie techniczne,

b) zespół stacjonarnych urządzeń technicznych powiązanych technologicznie,

do których tytułem prawnym dysponuje ten sam podmiot i położonych na terenie jednego zakładu,

c) obiekty budowlane niebędące urządzeniami technicznymi ani ich zespołami, których eksploatacja może spowodować emisję, (…)

*- **poważna awaria** - zdarzenie, w szczególności emisja, pożar lub eksplozja, powstałe w trakcie procesu przemysłowego, magazynowania lub transportu, w których występuje jedna lub więcej niebezpiecznych substancji, prowadzące do natychmiastowego powstania zagrożenia życia lub zdrowia ludzi lub środowiska lub powstania takiego zagrożenia*

z opóźnieniem,

*- **poważna awaria przemysłowa** - poważna awaria w zakładzie".*

W Ustawie z dnia 10 lipca 2008 roku o odpadach wydobywczych (Dz.U. 2022, poz. 2336) można znaleźć następujące definicje:

*- „**obiekt unieszkodliwiania odpadów wydobywczych** – obiekt przeznaczony do składowania odpadów wydobywczych w formie stałej, ciekłej, w roztworze lub zawiesinie, w tym hałdy i stawy osadowe, obejmujący tamy lub inne konstrukcje służące do powstrzymywania, zatrzymywania, ograniczania lub umacniania takiego obiektu; za obiekt unieszkodliwiania odpadów wydobywczych nie uznaje się wyrobiska górniczego wypełnianego odpadami wydobywczymi w celach rekultywacyjnych i technologicznych;*

*- **odpady przeróbcze** – odpady wydobywcze w formie stałej lub szlamu, które pozostają po przeróbce kopalin, przeprowadzonej w drodze procesów mechanicznych, fizycznych, biologicznych, termicznych lub chemicznych, a także z połączenia tych procesów;*

*- **odpady wydobywcze** – odpady pochodzące z poszukiwania, rozpoznawania, wydobywania, przeróbki i magazynowania kopalin ze złóż;*

*- **przemysł wydobywczy** – dział gospodarki zajmujący się odkrywkowym, podziemnym lub otworowym wydobywaniem kopalin ze złóż lub ich przeróbką;*

*- **przeróbka** – procesy mechaniczne, fizyczne, biologiczne, termiczne i chemiczne, a także połączenie tych procesów, którym są poddane wydobyte kopaliny, prowadzone w celu przygotowania ich do wykorzystania, w tym zmiana ich objętości, klasyfikacja, rozdzielanie i ługowanie, a także ponowna przeróbka poprzednio odrzuconych odpadów, z wyłączeniem procesów wytapiania, produkcyjnych procesów termicznych (innych niż wypalanie wapienia) i procesów metalurgicznych;*

*- **rekultywacja terenu** – zagospodarowanie terenu, w tym oczyszczanie gruntu, na który miał wpływ obiekt unieszkodliwiania odpadów wydobywczych, w taki sposób, aby przywrócić go do właściwego stanu użytkowego i przyrodniczego, ze szczególnym uwzględnieniem jakości gleby, dzikiej fauny i flory, siedlisk naturalnych, systemów słodkiej wody oraz krajobrazu;*
*- **staw osadowy** – obiekt przeznaczony do składowania drobnoziarnistych odpadów wydobywczych, w tym powstałych w wyniku przeróbki, wraz ze zmieniającą się ilością wody technologicznej, która pochodzi z przeróbki kopalin ze złóż, oraz z oczyszczania wody technologicznej;*
*- **tama** – obiekt budowlany przeznaczony do zatrzymania lub zamknięcia wody technologicznej lub odpadów wydobywczych w stawie osadowym".*

Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 roku o odpadach (Dz.U. 2023, poz. 1587, 1599, 1688, 1852, 2029) zawiera klasyfikacje odpadów i następujące definicje:
- „***gospodarowanie odpadami** – zbieranie, transport lub przetwarzanie odpadów, w tym sortowanie wraz z nadzorem nad wymienionymi działaniami, a także późniejsze postępowanie z miejscami unieszkodliwiania odpadów oraz działania wykonywane w charakterze sprzedawcy odpadów lub pośrednika w obrocie odpadami;*
*- **gospodarka odpadami** – wytwarzanie odpadów i gospodarowanie odpadami;*
*- **odpady** – każda substancja lub przedmiot, których posiadacz pozbywa się, zamierza się pozbyć lub do których pozbycia się jest obowiązany".*

Zapisy Ustawy z dnia 20 lipca 2017 roku Prawo wodne (Dz.U.2017, poz. 1566) regulują gospodarowanie wodami zgodnie z zasadą zrównoważonego rozwoju, w szczególności kształtowanie i ochronę zasobów wodnych, korzystanie z wód oraz zarządzanie zasobami wodnymi.

Rozporządzenie Ministra Klimatu z dnia 2 stycznia 2020 roku w sprawie katalogu odpadów (Dz.U. 2020, poz. 10) wymienia 20 grup odpadów, w tym grupę 01 – czyli odpady powstające przy poszukiwaniu, wydobywaniu, fizycznej i chemicznej przeróbce rud oraz innych kopalin, z kodem określającym grupy i podgrupy wraz z uszczegółowionym rodzajem odpadów, przykładowo:

- 01 01 – odpady z wydobywania kopalin

- 01 01 01 – odpady z wydobywania rud metali (z wyłączeniem 01 01 80)
- 01 01 02 – odpady z wydobywania kopalin innych niż rudy metali

- **01 01 80 – odpady skalne z górnictwa miedzi, cynku i ołowiu**
- 01 03 – odpady z fizycznej i chemicznej przeróbki rud metali
- 01 03 04* – odpady z przeróbki rud siarczkowych powodujące samoczynne zakwaszenie środowiska w czasie składowania
- 01 03 05* – inne odpady poprzeróbcze zawierające substancje niebezpieczne (z wyłączeniem 01 03 80)
- 01 03 06 – inne odpady poprzeróbcze niż wymienione w 01 03 04, 01 03 05, 01 03 80 i 01 03 81
- 01 03 07* – inne odpady zawierające substancje niebezpieczne z fizycznej i chemicznej przeróbki rud metali
- 01 03 08 – odpady w postaci pyłów i proszków inne niż wymienione w 01 03 07
- 01 03 09 – czerwony szlam powstający przy produkcji tlenku glinu inny niż wymieniony w 01 03 10
- 01 03 10* – czerwony szlam powstający przy produkcji tlenku glinu zawierający substancje stwarzające zagrożenie inny niż odpady wymienione w 01 03 07
- 01 03 80* – odpady z flotacyjnego wzbogacania rud metali nieżelaznych zawierające substancje niebezpieczne.

Dyrektywa 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2000 roku ustanawiająca ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej, wprowadza m.in. definicje silnie zmienionej części wód i części wód powierzchniowych:
- *„**silnie zmieniona część wód** – część wód powierzchniowych, których charakter został znacznie zmieniony na skutek fizycznego oddziaływania człowieka, według wskazania przez Państwo Członkowskie zgodnie z przepisami załącznika II Dyrektywy 2000/60/WE,*
- ***część wód powierzchniowych** – oddzielny i znaczący element wód powierzchniowych, taki jak: jezioro, zbiornik, strumień, rzeka lub kanał, część strumienia, rzeki lub kanału, wody przejściowe lub pas wód przybrzeżnych”*.

Celem Dyrektywy 2004/35/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 21 kwietnia 2004 roku w sprawie odpowiedzialności za środowisko w odniesieniu do zapobiegania i zaradzania szkodom wyrządzonym środowisku naturalnemu, jest ustalenie ram odpowiedzialności za środowisko w oparciu o zasadę „zanieczyszczający płaci”.

Bazując na zapisach Dyrektywy 2006/12/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 5 kwietnia 2006 roku w sprawie odpadów (art. 2, pkt. 1), „odpady wynikające z poszukiwania, wydobywania, przetwarzania oraz składowania zasobów mineralnych oraz działalności odkrywkowej" są wyłączone z zakresu tej Dyrektywy.

Biorąc pod uwagę zapisy Dyrektywy 2008/98/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 19 listopada 2008 roku w sprawie odpadów oraz uchylająca niektóre dyrektywy (art. 2, pkt. 2), „odpady powstałe w wyniku poszukiwania, wydobywania, przetwarzania i składowania zasobów mineralnych oraz z działalności odkrywkowej objęte dyrektywą 2006/21/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 15 marca 2006 roku w sprawie gospodarowania odpadami pochodzącymi z przemysłu wydobywczego" są wyłączone z zakresu tej Dyrektywy.

Dyrektywa 2010/75/UE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 24 listopada 2010 roku w sprawie emisji przemysłowych (zintegrowane zapobieganie zanieczyszczeniom i ich kontrole) ustanawia zasady dotyczące zintegrowanego zapobiegania zanieczyszczeniom powstającym w wyniku działalności przemysłowej oraz zasady dotyczące kontroli tych zanieczyszczeń. Ustanawia również zasady mające na celu zapobieganie emisjom do powietrza, wody i ziemi oraz, w przypadku braku takiej możliwości, mające na celu ich redukcję oraz zapobieganie wytwarzaniu odpadów, w celu osiągnięcia wysokiego poziomu ochrony środowiska jako całości.

Do grupy norm i standardów dotyczących sprzętu i technologii stosowanych w hydrotransporcie zalicza się następujące normy:

- PN-EN 14899:2006 Charakteryzowanie odpadów. Pobieranie próbek materiałów. Struktura przygotowania i zastosowania planu pobierania próbek,
- PN-EN 14735:2022-04 Charakterystyka odpadów - Przygotowanie próbek odpadów do badań ekotoksyczności (Characterization of waste - Preparation of waste samples for ecotoxicity tests),
- PN-EN ISO 14001:2015 System zarządzania środowiskowego,
- PN-EN ISO 14040:2009 Zarządzanie środowiskowe. Ocena cyklu życia. Zasady i struktura.

2.2. Charakterystyka hydrotransportu

Hydrotransport ma zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu. Ciecze będące w ruchu są w stanie, przy spełnieniu pewnych określonych warunków, unosić cząstki ciał stałych i przenosić je na duże odległości. Zjawisko przenoszenia materiałów przez przepływającą ciecz z dużą energią, z jakim jest bez wątpienia woda, obserwuje się w czasie katastrof zapór rzecznych, powodzi, zniszczeń wałów ochronnych, przypływów mórz, sztormów (Dunikowski i in., 1976; Palarski, 1982; Tukker i in., 2016)

Za pomocą hydrotransportu w KGHM Polska Miedź S.A. są transportowane odpady. Niewątpliwie na efektywność hydrotransportu mają wpływ fizyczne właściwości odpadów, takie jak:

- gęstość,
- granulometria,
- lepkość,
- zawartość wody.

Gęstość odpadów wpływa na wybór technologii transportu, zaś lepkość na przepływ i dobór pomp do hydrotransportu. Na efektywność hydrotransportu i pompowania ma wpływ granulometria, czyli rozmiar przemieszczających się cząstek.

Hydrotransport odpadów jest dynamicznie rozwijającą się dziedziną, zarówno w Polsce, jak i na świecie (Jacobs, 1991; Concha, 2014; Wee i Yap, 2019).

Publikacje dotyczące hydrotransportu wskazują na jego efektywność i korzyści środowiskowe. Prowadzone badania koncentrują się na studium przypadków zrealizowanych projektów hydrotransportu w Polsce, które ukazują praktyczne aspekty jego stosowania w gospodarce odpadami (Kęska, 1977, 1981; Sobota i Kril, 1994; Okrajni i in., 1996; Lembas i Maślanka, 1998; Gołębiewska i Lipiński, 2000; Matras, 2001; Jaroń-Kocot, 2004; Kempiński i Smilgin, 2009; Szerakowska, 2014).

Hydromieszanina przemieszcza się w połączonych ze sobą szeregowo rurach tworzących rurociąg lub w korytach. Zespół urządzeń dozująco-tłoczących, pośrednich, jak pompy, zbiorniki, komory, itp. i odbierających oraz przewód tworzą instalację. Rurociągi mogą być prowadzone jako pojedyncze linie i mogą się rozgałęziać, tworząc sieć (Palarski, 1982).

Ze względu na źródło energii wprowadzającej hydromieszaninę w ruch wyróżnia się:

- instalacje bezciśnieniowe, bez urządzenia wytwarzającego różnicę ciśnień,
- instalacje ciśnieniowe, pompowe.

W instalacjach bezciśnieniowych przepływ odbywa się na skutek różnicy wysokości pomiędzy wlotem a wylotem rurociągu lub rynien.

Wyróżnia się następujące rodzaje instalacji bezciśnieniowej (Palarski, 1982):

- otwarte, w których hydromieszanina przepływa w rynnach, korytach i kanałach, o różnym kształcie przekroju poprzecznego,
- rurowe, nazywane grawitacyjnymi, w których transport hydrauliczny odbywa się w rurociągu składającym się z części pionowej i poziomej.

W instalacjach ciśnieniowych, źródłem zasilania jest pompa, przez którą bezpośrednio przepływa hydromieszanina lub pompa, która tłoczy wodę do rurociągu połączonego z urządzeniem dozującym ziarna ciał stałych.

W zależności od zasięgu hydrotransportu wyróżnia się (Palarski, 1982):

- instalacje stałe lub przenośne o zasięgu do kilkuset metrów (przykładem są instalacje do transportu betonu, pogłębiania kanałów i dna morskiego),
- instalacje stałe lub przenośne o zasięgu od kilkuset metrów do 10 km (przykładem są instalacje stosowane przy transporcie surowców eksploatacyjnych z dna morskiego, instalacje służące do transportu odpadów na zwały),
- instalacje stałe – magistralne hydrotransportu o długości większej od 10 km (przykładem są instalacje do transportu węgla lub rudy).

Kryteria podziału instalacji hydrotransportu zależą od (Palarski, 1982):

- rodzaju transportowanego medium – transport osadów, cieczy, mieszanin, odpadów stałych, ciekłych, zawiesin,
- typu pompy – pompy tłokowe, wirnikowe, odśrodkowe, itp.,
- ciśnienia i przepływu,
- rodzaju transportu – transport wewnętrzny w zakładach, transport na dłuższe odległości.

W literaturze można również znaleźć inne kryterium podziału instalacji hydrotransportu pompowego, które jest uzależnione od wartości ciśnienia (Palarski, 1982):

- instalacje niskociśnieniowe – ciśnienie od 0,3 do 0,7 MPa,
- instalacje średniociśnieniowe – ciśnienie od 0,7 do 2,5 MPa,
- instalacje wysokociśnieniowe – ciśnienie od 2,5 do 7,0 MPa,
- instalacje magistralne – ciśnienie powyżej 5,0 MPa.

Instalacje grawitacyjne hydrotransportu ze względu na panujące w nich maksymalne ciśnienie p i prędkość hydromieszaniny V_m dzieli się na:

- instalacje płytkie – $p < 6{,}4$ MPa i $V_m < 10$ m/s,
- instalacje głębokie – $p > 6{,}4$ MPa i $V_m > 10$ m/s; $p > 6{,}4$ MPa i $V_m < 10$ m/s; $p < 6{,}4$ MPa i $V_m > 10$ m/s.

Usytuowanie przestrzenne przewodu rurociągu jest dowolne i zależy m.in. od ukształtowania terenu trasy instalacji hydrotransportu oraz celu zastosowania. Rurociągi najczęściej są położone poziomo i są to instalacje ciśnieniowe. Przy stosowaniu hydrotransportu w kopalniach występują ciągi pionowe, poziome i nachylone, a podczas eksploatacji surowców z dna oceanu występują tylko ciągi pionowe i krótkie poziome.

W ciągach pionowych transport odbywa się w dwóch kierunkach, tj. z dołu do góry i z góry do dołu (Palarski, 1982).

Zespół urządzeń zasilających i dozujących zawiera najczęściej następujące elementy:

- urządzenia transportu i dozowania materiału,
- rurociągi wodne z osprzętem,
- zbiorniki materiału, wody i hydromieszaniny,
- urządzenia kruszące i klasyfikujące materiały ziarniste,
- pompy, sprężarki, śluzy, itp.,
- dawkowniki,
- studnie, skrzynie, leje,
- układy sterowania z aparaturą kontrolno- pomiarową,
- stacje zasilające, przepompownie (stosowane w instalacjach dalekiego zasięgu).

Dobór powyższych urządzeń do stosowania na sieci hydrotransportu jest zależny od rodzaju instalacji, własności transportowanego materiału oraz sposobu dozowania do rurociągu (Palarski, 1982).

Najważniejszym elementem stacji odbierającej są urządzenia do odwodnienia (stacje odwadniające) bądź same urządzenia do przyjęcia hydromieszaniny, takie jak staw osadowy, obiekt unieszkodliwia odpadów wydobywczych, hydrocyklony, zagęszczacze, wirówki, itp.

Podstawą zaprojektowania instalacji hydrotransportu jest znajomość (Jarige i in., 1961; Parzonka, 1977; Raczkowski, 1978; Adamek, 1980; Kęska, 1981; Palarski, 1982; Czaban, 1988; Lisowski, 1992; Jaworowska i in., 2008; Paterson, 2011):

- parametrów ruchu mieszaniny w przewodzie, czyli jednostkowych strat energetycznych oraz prędkości krytycznej osadzania mieszanin sedymentujących lub wartości prędkości dla której hydromieszaninę można uważać za ciecz jednorodną,
- charakterystyk lokalnych przepływu, takich jak: rozkłady zagęszczenia, uziarnienia

  i prędkości faz w przekroju pionowym przewodu zamkniętego (rurociągu) lub przewodu otwartego (np. koryta, rynny), różnicy prędkości faz ciał stałych i cieczy nośnej**,** składowej prędkości ruchu pobocznego**,**
- zmienności w czasie w wybranym punkcie sieci lub w objętości strumienia: prędkości przepływu, ciśnienia, zagęszczenia,
- rozdrobnienia ziaren ciał stałych podczas transportu,
- ścieralności rur, urządzeń i pomp.

W instalacjach hydrotransportu przepływa mieszanina ziaren ciał stałych, cieczy nośnej, niewchodzących ze sobą w reakcję chemiczną.

Podstawowym parametrem charakteryzującym stopień nasycenia hydromieszaniny ziarnami ciał stałych jest zagęszczenie (koncentracja), czyli zawartość objętościowa ziaren ciał stałych w określonej objętości hydromieszaniny.

Istotnym badanym elementem w hydrotransporcie przez wielu światowych ekspertów naukowych są właściwości odpadów rud metali i konieczność wykorzystania odpadów do budowy zapór. Powstało wiele ośrodków naukowych z prowadzonymi konferencjami naukowymi poświęconymi głównie odpadom. Przykładem jest Uniwersytet Stanowy w Colorado (USA) oraz ośrodki naukowe w Kanadzie, RPA, Japonii, we Włoszech i w Polsce, w których prowadzone są badania parametrów wytrzymałościowych odpadów (Tschuschke, 2006; Van Geen i in., 1998; Davies i in., 2002; Tschuschke i Skowrońska, 2015; Fourie i in., 2019).

Hydrotransport znalazł zastosowanie w przemyśle wydobywczym, również w transporcie minerałów lub osadu z dna mórz. Wyróżnia się wówczas instalacje hydrotransportu pompowego (Palarski, 1982).

Reasumując, można stwierdzić, że instalacja hydrotransportu odpadów, m.in. rurociągów, armatury (pomp, zasuw, kompensatorów, itp.) i jej stopień degradacji, zniszczenia, a co za tym idzie awarii jest zależny od wielu różnych czynników, takich jak:

- rozmiar i kształt ziaren transportowanych frakcji,
- prędkości transportowanego medium,

- charakterystyki medium – gęstości, temperatury, lepkości, ciśnienia, objętości, stanu skupienia.

2.3. Wybrane przykłady dużych instalacji hydrotransportu

Poniżej przedstawiono kilka ważnych instalacji hydrotransportu na duże odległości.

- **Ohio-Pipeline w USA (1800)** - trasa instalacji prowadzi od kopalni w miejscowości Cadiz do elektrowni w Eastlake. Została wybudowana przez Towarzystwo Consolidation Coal Company. Długość instalacji wynosiła 175 km, a wydajność 250-360 m^3/h. Transportowano w niej węgiel kamienny o zawartości około 35% części lotnych. Węgiel z zakładu przeróbczego podawany był do stacji pomp z wodą w takich ilościach, które pozwalały uzyskać procentowy stosunek ciał stałych do wody wynoszący 30:70. Następnie procentowy stosunek ciał stałych do wody zwiększono i wynosił 58:42. W celu zapobiegania korozji, a w następstwie awarii, do rurociągów do cieczy nośnej dodawano środki chemiczne. Z uwagi na to, że zapotrzebowanie elektrowni w Eastlake na węgiel było zmienne, dlatego należało dokonywać na bieżąco zmian natężenia przepływu hydromieszaniny przez rurociąg. Regulację tę przeprowadzano zmieniając wartości średniej prędkości hydromieszaniny w przedziale 1,30÷1,98 m/s. Można stwierdzić, że ciągłe pomiary i obserwacje prowadzone dla tej instalacji pozwoliły na wprowadzenie wielu udoskonaleń, które przyczyniły się do zmniejszenia obsługi stacji pomp z 17 osób do 7 osób.

- **Blach-Mesa-Pipeline w USA (Arizona, lata 1969 i 1970) -** instalacja o długości 440 km. Transportuje się nią węgiel z kopalni odkrywkowej Black-Mesa do Coalfield do elektrowni Mohave. Ukształtowanie terenu na trasie instalacji jest zmienne. Średnicę rurociągu poziomego przyjęto równą 457 mm, natomiast opadającego 254 mm. Wydajność instalacji wynosiła około 600 ton węgla/h. Zagęszczenie hydromieszaniny (wagowo) wynosiło 45÷55%. Frakcją przewodnią są ziarna o średnicy 1,4 mm. Pompy stosowane w tym transporcie mają wydajność wynoszącą 1200 m^3/h oraz moc 1300 kW. Na stacjach pomp znajdują się zbiorniki z wodą, którą można w uzasadnionych przypadkach wprowadzać do rurociągu oraz zbiorniki, do których można odprowadzać hydromieszaninę. Na końcu instalacji znajdują się urządzenia odwadniające, pozwalające uzyskać węgiel o zawartości wody 25÷30% (wagowo). Od roku 1972 roku instalacja ta pracuje jako badawczo-przemysłowa.

- **Kopalnia Merlebach – Elektrownia Muchet (Francja, 1904)** – węgiel kamienny jest transportowany na odległość 9,0 km. Wydajność transportowa wynosi 110 t/h, średnica rurociągu 0,375 m, gęstość transportowanego materiału wynosi 1,4 t/m^3, zaś prędkość przepływu wynosi 2,5 m/s (Palarski, 1982).

- W Polsce pracuje jedna z największych na świecie instalacji hydrotransportu odpadów poflotacyjnych **Żelazny Most koło Lubina**. Instalacja łączy Zakłady Przeróbcze kopalń rudy miedzi Zakładów Górniczych ZG Lubin, ZG Polkowice i ZG Rudna z Obiektem Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych OUOW Żelazny Most, a obecnie z Kwaterą Południową z zagęszczanym na hydrocyklonach odpadem poflotacyjnym.

2.4. Wybrane przykłady awarii instalacji technicznych

Awaria infrastruktury technicznej to niekontrolowany wypływ medium (wody, cieczy) z rurociągu bądź armatury w wyniku pęknięcia, korozji bądź nieszczelności pozostałej instalacji technologicznej, jak również z powodu źle wykonanych prac technologicznych na budowie.

Przykładem awarii armatury może być brak możliwości domknięcia się zasuw, pęknięte uszczelki w wyniku degradacji materiału przez dane medium bądź działanie dużej, zmiennej siły docisku, przy gwałtownym wzroście ciśnienia dynamicznego w sieci rurociągu. Przyczyną awarii mogą być również skorodowane poszczególne elementy armatury technicznej oraz naturalne zużycie materiału w wyniku przepływającego medium tłoczonego w sieci technologicznej. Najsłabszym elementem w układzie technologicznym są połączenia spawane/zgrzewane oraz szwy powstałe w trakcie produkcji rury, jako materiału docelowego w sieci.

Awarie (katastrofy) przemysłowe są spowodowane przez zakłady przemysłowe i związane z nimi wybuchy, pożary, skażenia (wód i powietrza), katastrofy budowlane wyrządzające straty ekologiczne, materialne oraz zagrażające zdrowiu i życiu pracowników, służb ratunkowych i okolicznych mieszkańców. W wyniku awarii/katastrof mogą pojawić się ranni i ofiary śmiertelne.

Poniżej przedstawiono kilka przykładów katastrof związanych z infrastrukturą techniczną, a w szczególności z urządzeniami gazowymi, urządzeniami i rurociągami transportującymi ropę naftową, urządzeniami kanalizacyjnymi, infrastrukturą wodociągową oraz z instalacją hydrotransportu (www.archiwum.ciop.pl):

- katastrofa chemiczna w Czechowicach-Dziedzicach (Polska, 26 czerwca 1971 r.)

W Czechowicach-Dziedzicach w województwie śląskim, 26 czerwca 1971 roku ok. godz. 19:50 piorun uderzył w kopułę zbiornika nr 1 rafinerii, w wyniku czego zbiornik stanął w płomieniach pożaru. Pomimo pożaru, nie przerwano tłoczenia ropy ze zbiornika nr 1 na oddział destylacji. Przetłaczano również ropę naftową z cystern kolejowych do zbiornika nr 4. W nocy ok. godz. 1:30 nastąpił wybuch płonącego zbiornika nr 1, a następnie zbiornika nr 4. Pożar objął dwa pozostałe zbiorniki, przepompownię i oddział produkcji olejów silnikowych oraz inne miejsca. Nad ranem podjęto decyzję o ewakuacji okolicznych mieszkańców. Pożar został opanowany po ok. 60 godzinach. W wyniku katastrofy zginęło 37 osób, ponad 100 osób zostało ciężko poparzonych i odniosło inne obrażenia. Straty materialne były ogromne. Zniszczeniu uległo 30 wozów strażackich.

- katastrofa tamy i elektrowni wodnej w Banquiao (Chiny, 1975 r.)

Tama w Banquiao w prowincji Henen w Chinach uległa zniszczeniu podczas tajfunu Nina, a w wywołanej przez to powodzi zginęło 26 tys. osób. W następstwie epidemii, która wybuchła po powodzi, zmarło następne 145 tys. osób. Prawdopodobnie, oficjalne dane dotyczące tej katastrofy są zaniżone.

- katastrofa budowlana w Rotundzie PKO w Warszawie (Polska, 15 lutego 1979 r.)

Wybuch gazu nastąpił 15 lutego 1979 roku o godzinie 12:37 w budynku banku PKO, znajdującym się u zbiegu ulicy Marszałkowskiej i Alei Jerozolimskich.

Do eksplozji doszło na dwadzieścia minut przed końcem pierwszej zmiany, gdy w banku znajdowało się ok. 170 pracowników i 300 klientów. W momencie wybuchu cały gmach uniósł się nagle, niczym – jak relacjonowali świadkowie zdarzenia – „bańka mydlana", po czym „pękł" – z przeszklonych ścian na ulice runęły tafle szkła, wewnątrz zaś do podziemi archiwum zapadły się wszystkie kondygnacje budynku. Uszkodzone zostały także sąsiednie budynki.

W katastrofie śmierć poniosło 49 osób, a ok. 77 osób zostało rannych. Liczba rannych mogła być jednak wyższa. W czasie prac konserwacyjnych zbyt silnie została dokręcona śruba kryzy mocującej zawór gazu. W wyniku skurczu termicznego, wywołanego niską temperaturą, zbyt mocnego dokręcenia kryzy oraz ruchów podłoża (wywołanych komunikacją naziemną i podziemną linią średnicową PKP, oddaloną od miejsca katastrofy o 8 m) doszło do pęknięcia kopuły zaworu i powstania 77-centymetrowej szczeliny,

w której nastąpiło ulatnianie się gazu, który przedostał się do instalacji telekomunikacyjnej,
a stamtąd do wnętrza budynku. Wybuch zainicjował zwarcie w instalacji elektrycznej.

- katastrofa w San Juanico - Ixhuatepec k. Meksyku (Meksyk, 19 listopada 1984 r.)

Katastrofa w San Juanico–Ixhuatepec w 1984 roku należy do jednych z największych i najtragiczniejszych w skutkach eksplozji gazu na świecie. Miasto Meksyk, liczące ponad 16 mln. mieszkańców, zużywa wielkie ilości gazu. Wokół miasta znajduje się kilka magazynów gazu. W magazynach w San Juanico - Ixhuatepec, na przedmieściach Meksyku, w 48 poziomych cylindrycznych zbiornikach oraz wielkich sferycznych zbiornikach (2400 i 1500 m^3) magazynowano ciekły gaz LPG (*Liquid Petroleum Gas*), który zazwyczaj składa się w 80% z butanu i 20% z propanu. Ten rodzaj gazu używany jest głównie do zaspokajania potrzeb bytowych mieszkańców Meksyku.

Fot. 2.1. Katastrofa w San Juanico – Ixhuatepec k. Meksyku (Meksyk, 19 listopada 1984 r.) (www.archiwum.ciop.pl, 2024)

Przyczyną inicjującą katastrofę było pęknięcie 8-calowego rurociągu zasilającego, na co wskazywały zakłócenia zarejestrowane w przepompowni odległej o ok. 40 km. Snująca się w warstwie przyziemnej powietrza chmura gazu (propan - butan jest cięższy od powietrza), zapalając się od pochodni, która spalała nadmiar gazu, spowodowała dalsze katastrofalne zdarzenia. Pod wpływem wysokiej temperatury powstały uszkodzenia zbiorników oraz wybuchy.15 spośród 48 cylindrycznych zbiorników, każdy o masie własnej ok. 20 t, zmieniło się w pociski i przemieściło na odległość ponad 100 m. Niektóre ze zbiorników przemieściły się nawet 1000÷1200 m, co powodowało zniszczenia poza terenem zakładu. Cztery wielkie zbiorniki sferyczne (1500 m^3) przestały

istnieć w wyniku wybuchu BLEVE *(Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion* - to eksplozja rozprężającej się pary wrzącej cieczy). Na skutek wybuchu powstały kule ogniste (o średnicy 200÷300 m, czas trwania wynosił ok. 20 s), którym towarzyszyły silne promieniowanie termiczne, gwałtowna siła podmuchu oraz odłamki i przemieszczające się na dużą odległość - płonące krople gazu („deszcz ognia"). W wyniku katastrofy zginęło ok. 550 osób, ponad 2000 odniosło ciężkie poparzenia i inne urazy. Ok. 60 tys. mieszkańców zostało ewakuowanych. Straty materialne i środowiskowe powstałe w wyniku pożaru i wybuchu ok. 12 tys. m^3 ciekłego gazu LPG były ogromne, również na skutek mechanicznych oddziaływań fragmentów zbiorników (np. 10÷40 tonowe fragmenty zbiorników cylindrycznych w wyniku wybuchu BLEVE, pokonały dystans 100÷890 m).

- katastrofa przemysłowa w Bhopal (Indie, 3 grudnia 1984 r.)

Katastrofa w Bhopal była jedną z najtragiczniejszych chemicznych katastrof przemysłowych. Jej przebieg, polegający na uwolnieniu do atmosfery dużych ilości niebezpiecznych, toksycznych substancji chemicznych, nie spowodował dramatycznych zniszczeń fizycznych w zakładzie i w środowisku, natomiast liczba ofiar śmiertelnych i ciężko poszkodowanych była ogromna. Pod tym względem była to największa katastrofa przemysłowa na świecie. Zakłady w Bhopalu, należące do koncernu Union Carbid, produkowały insektobójczy środek, znany pod handlową nazwą Sevin, oraz podobny środek - Temik. W pierwszej fazie działalności zakładu, począwszy od 1977 roku, Sevin i Temik były produkowane na bazie importowanego z USA izocyjanku metylu (MIC) - substancji zaliczonej do wysoko toksycznych. Od 1980 roku w Bhopalu uruchomiono również produkcję izocyjanku metylu MIC. Zdolność wytwórcza zakładu wynosiła 5000 t/rok obu tych insektycydów.

Fot. 2.2. Katastrofa przemysłowa w Bhopal (Indie, 3 grudnia 1984 r.) (www.archiwum.ciop.pl, 2024)

Do rana 4 grudnia 1984 roku zmarło kilka tysięcy osób, ale w wyniku narażenia na izocyjanian metylu ludzie umierali jeszcze dużo później – całe lata po awarii. Całkowitą liczbę ofiar śmiertelnych katastrofy w Bhopalu szacuje się na 18÷20 tysięcy. W Bhopalu tysiące ludzi trwale straciło zdrowie i zdolność do wykonywania pracy. Łączną liczbę poszkodowanych (tzn. osób, które były narażone na kontakt z toksyczną substancją) szacuje się w granicach ok. 500÷700 tysięcy, w tym przynajmniej 200 tys. dzieci. Ewakuacja ok. 200 tys. osób zapobiegła jeszcze bardziej tragicznym skutkom tej katastrofy.

Przyczynami katastrofy było (www.archiwum.ciop.pl):
- zbudowanie zakładu używającego i magazynującego wielkie ilości bardzo toksycznych gazów i lotnych cieczy na gęsto zaludnionym obszarze (Bhopal liczy ok. 700 tysięcy mieszkańców),
- likwidacja 5-6 miesięcy przed katastrofą, pierwotnie stosowanego systemu chłodzenia zbiorników izocyjanku metylu MIC o pojemności 57 m^3. W zakładach amerykańskich do chłodzenia stosowany jest chloroform. Chłodzenie i odpowiednia izolacja zbiorników są niezwykle istotne przy niskich temperaturach ≤0°C. Silnie egzotermiczne procesy polimeryzacji lub hydrolizy MIC są mało prawdopodobne w temperaturze powyżej 15°C, mogą następować z niedużą prędkością, jednak wskutek ich egzotermiczności i braku odpowiedniego chłodzenia lub przy dostępie wody ulegają niekontrolowanemu przyspieszeniu, co może doprowadzić do awarii. Taki właśnie przebieg zdarzeń doprowadził do awarii.

Analizując przyczyny awarii/katastrofy w Bhopal, licznych zwolenników miała też teza o wprowadzeniu do zbiornika wody, w wyniku sabotażu lub nieszczelności zaworu. Na skutek zachodzących procesów polimeryzacji lub hydrolizy MIC nastąpił prawdopodobnie wzrost temperatury do ok. 200°C. Wzrost ciśnienia nie spowodował rozerwania zbiornika i rurociągów (po katastrofie były one szczelne), natomiast nagrzanie zaworów spowodowało pęknięcia betonu - przez powstałe nieszczelności zostało uwolnione do atmosfery ok. 40 ton par izocyjanku metylu w ciągu ok. jednej godziny, zanim wyciek został opanowany.

- katastrofa w elektrowni jądrowej w Czarnobylu (Ukraina, 26 kwietnia 1986 r.)

W dniu 26 kwietnia 1986 roku, w wyniku utraty kontroli nad przebiegiem przeprowadzanych w elektrowni jądrowej w Czarnobylu testów nad pracą reaktora, w warunkach awarii doszło do wybuchu wodoru, pożaru i rozprzestrzenienia się substancji radioaktywnych na większą część Europy. Najbardziej został skażony obszar ok. 130 tys. km^2 na pograniczu Rosji, Białorusi i Ukrainy. 134 pracowników elektrowni i członków ekip ratowniczych było narażonych na działanie niebezpiecznych dawek promieniowania jonizującego; 28 z nich zmarło w wyniku choroby popromiennej, a dwóch od poparzeń. W wyniku katastrofy przesiedlono ponad 350 tys. osób.

- katastrofa w Schweizerhalle, Bazylea (Szwajcaria, 1 listopada 1986 r.)

Fot. 2.3. Katastrofa w Schweizerhalle (Szwajcaria, 1 listopada 1986 (www.archiwum.ciop.pl, 2024)

W magazynach firmy Sandoz, w których znajdowało się ok. 680 ton pestycydów, nastąpił pożar. Zanieczyszczona pestycydami na bazie rtęci oraz cynku a także fosforoorganicznymi insektycydami (dichlorvos, disulfoton, parathion i inne) woda użyta do gaszenia pożaru spłynęła systemem kanalizacyjnym do Renu. Masa tych substancji, które przedostały się do Renu, wynosiła od 5 do ok. 20 ton. Skutki tej awarii były nadzwyczaj poważne: życie biologiczne w Renie zostało zniszczone na długości ok. 400 km rzeki; ujęcia wody dla wodociągów w Niemczech i w Holandii zostały zamknięte; zaś na francuskim brzegu rzeki została całkowicie zlikwidowana działalność gospodarcza oraz turystyka.

- awaria rurociągu w Asza −Ufa, okolice Uralu (tereny ZSRR (Rosja), 1989 r.)

Eksplozja rurociągu gazu ziemnego nastąpiła w chwili, gdy dwa pociągi osobowe, przewożące około 1200 pasażerów koleją transsyberyjską między Aszą a Ufą mijały się

w pobliżu rurociągu. W wyniku emisji gazu z rurociągu utworzyły się miejsca o znacznym jego stężeniu. Iskry kół przejeżdżających pociągów były źródłem zapłonu. Zginęło 645 osób, a drugie tyle doznało obrażeń.

Ustalając przyczyny katastrofy stwierdzono, że w 1985 roku koparka uszkodziła rurociąg, co z upływem kilku lat doprowadziło do znacznego rozszczelnienia rurociągu i ostatecznie do zaistniałej katastrofy.

- awaria rurociągu na tankowcu w Exxon Valdez (Alaska, 1989)

Awaria rurociągu na tankowcu spowodowała bardzo duże zanieczyszczenie ropą wybrzeża Alaski. Awaria zaburzyła bardzo istotnie ekosystem i życie miejscowej ludności.

- katastrofa ekologiczna – przerwanie zapór składowiska w Merriespruit (RPA, 1994)

- katastrofa ekologiczna w Los Frailes (Hiszpania, 1998)

Ze składowiska Los Frailes w Hiszpanii spłynęło ok. 5,5 mln m^3 toksycznych odpadów do rzeki Rio Afrio, a następnie do Oceanu Atlantyckiego.

- awaria w fabryce złota w Baia Mare (Rumunia, 31 stycznia 2000 r.)

Fot. 2.4. Katastrofa w fabryce złota w Baia Mare (Rumunia, 31 stycznia 2000 r.) (www.archiwum.ciop.pl, 2024)

Topniejący śnieg po bardzo obfitych opadach uszkodził obwałowania osadników i zbiorników szlamów poflotacyjnych w kompleksie wydobywczo-produkcyjnym złota Aurul w Baia Mare w Rumunii. W wyniku przerwania zapory wyciekł cyjanek i inne metale ciężkie. Toksyczne związki szybko przedostawały się do kolejnych rzek

w Rumunii, na Węgrzech, w Serbii i Bułgarii, zabijając ryby i inne organizmy żywe oraz zatruwając wodę pitną. Spowodowało to poważną dewastację środowiska wodnego.

- katastrofa w rafinerii ropy naftowej w Texas City (USA, 23 marca 2005 r.)

Katastrofa wydarzyła się w największej rafinerii ropy naftowej koncernu BP International w Stanach Zjednoczonych. Wielkość przerobu wynosiła 460000 baryłek ropy dziennie, tj. ok. 73 mln. litrów), produkującej m.in. ok. 11 mln galonów (ok. 42 mln. litrów) benzyny dziennie. Katastrofa miała miejsce na wydziale izomeryzacji wytwarzającym wysokooktanowe dodatki do benzyny bezołowiowej i objęła instalację separatora rafinatu oraz instalację odparowania węglowodorów. Instalacja separatora została zatrzymana planowo w celu konserwacji. Po jej zakończeniu rozpoczęto przygotowania do rozruchu. Wykonano próby ciśnieniowe za pomocą azotu, a następnie sprawdzono przyrządy kontrolno-pomiarowe. Jak się później okazało, przed rozruchem nie sprawdzono przyrządów pomiarowych wieży odparowywacza, co było wymagane przez procedury.

Fot. 2.5. Katastrofa w rafinerii naftowej w Texas City (USA, 23 marca 2005 r.) (www.archiwum.ciop.pl, 2024)

Podczas uruchomienia instalacji separatora wystąpiły nieprawidłowości, które spowodowały zakłócenia kontroli poziomów napełnienia. Ponadto w centralnej sterowni popełniono kilka błędów. W wyniku tych zdarzeń nastąpiło przekroczenie poziomów alarmowych, nadmierny wzrost temperatury, utracono kontrolę nad parametrami procesowymi, co doprowadziło do gwałtownego parowania, wzrostu ciśnienia, wyrzutów rafinatu (gejzery), i w konsekwencji do eksplozji oraz pożaru. Śmierć poniosło 15 osób, liczba rannych wyniosła ponad 170. Większość ofiar śmiertelnych oraz osób rannych

znajdowała się w jednej z kilku pakamer oraz obok niej. Instalacje separatora i odparowania węglowodorów zostały zniszczone.

- awaria w Viareggio (Włochy, 29/30 czerwca 2009 r.)

Poważna awaria miała miejsce przed północą w środku miasta, gdzie przebiegają tory kolejowe. W pociągu towarowym, składającym się z 14 wagonów/cystern przewożących gaz ciekły LPG, prawdopodobnie wskutek pęknięcia osi w jednym z wagonów, doszło do wykolejenia uszkodzonego wagonu oraz kolejnych trzech cystern. Wagony/cysterny uderzyły w budynki stojące w pobliżu torów; dwie cysterny eksplodowały, powodując zniszczenia oraz pożar. Pożar ogarnął 10 domów, w tym dwa budynki od razu się zawaliły. Zniszczonych zostało wiele zabudowań w promieniu 300 m. W wyniku katastrofy śmierć poniosły 22 osoby, a 33 zostały ranne. Ewakuowano ok. 1000 osób, natomiast ok. 100 osób pozostało bez dachu nad głową.

- wyciek toksycznych substancji w Zakładach aluminiowych w Ajkai (Węgry, październik 2010 r.)

W Zakładach aluminiowych w Ajkai na Węgrzech nastąpił wyciek toksycznych substancji z przerwanego zbiornika z odpadami. Ze zbiornika wyciekło ok. 1 mln. m^3 wyjątkowo żrącego i lekko radioaktywnego materiału, tzw. „czerwonego szlamu", poważnie szkodząc ludziom i przyrodzie. Szlam zawierał bardzo niebezpieczne metale ciężkie, takie jak ołów, kadm, arsen i chrom, które przenikają do łańcucha pokarmowego i pozostają w środowisku przez długi czas. Substancja przedostała się do Dunaju.

- katastrofa w elektrowni jądrowej FUKUSHIMA II (Japonia, marzec 2011 r.)

Katastrofa w północnej Japonii w elektrowni Fukushima II nastąpiła po trzęsieniu ziemi i tsunami, które dotknęły północno-wschodnią część wyspy Honsiu. Fala tsunami zalała obszar elektrowni, uszkodziła system chłodzenia, co spowodowało stopienie się rdzeni reaktorów oraz skażenie wód oceanicznych przez wodę chłodniczą. Z obszaru katastrofy ewakuowano ok. 300 tys. osób (również za sprawą tsunami). Na podwyższone dawki promieniowania narażeni byli członkowie ekip ratowniczych (kilkadziesiąt osób).

- awaria rurociągu gazowego (RPA, 2014 r.)

W wyniku rozszczelnienia połączenia spawanego rurociągu gazowego wyciekło 800000 litrów ropy naftowej.

- awaria rurociągu Plains All American (Kalifornia, Santa Barbara, 2015)

Z powodu pęknięcia rurociągu Plains All American w Kalifornii, wyciekła ropa naftowa w dużej ilości. Awaria spowodowała znaczne zanieczyszczenie wybrzeży. Rurociąg był wykonany ze stali węglowej, tj. materiału powszechnie stosowanego z uwagi na jego wytrzymałość. Materiał ten jest podatny na korozję i uszkodzenia mechaniczne.

- awaria przepompowni ścieków w Gdańsku (Polska, 10 maja 2019 r.)

W wyniku awarii przepompowni, w ciągu trzech dni, nastąpił spływ ścieków do rzeki Motławy, a następnie do Zatoki Gdańskiej. Awarię spowodowało zalanie komory pomp

i znajdujących się tam 4 silników pomp, w tym: 2 głównych i 2 rezerwowych silników. Eksperci badający przyczynę awarii wskazali na kilka zaistniałych równocześnie czynników, które przyczyniły się do wystąpienia powyższej awarii, tj.:

- krótkotrwałe zaniki napięcia przy równoczesnym odłączonym systemie awaryjnym zasilania układu sterowania,
- brak retencji w rurociągu grawitacyjnym doprowadzającym ścieki do przepompowni,
- niska wydajność pomp w związku z zapchaniem wlotów wirników częściami stałymi będącymi w ściekach,
- nieprawidłowe działanie zasuwy awaryjnej pozostawionej w stanie częściowo otwartym (ok. 54% otwarcia), pomimo sygnalizowania jej całkowitego zamknięcia (0% otwarcia),
- niepełne zamknięcie klapy włazowej komory pomp i po zalaniu niekontrolowany wypływ ścieków poza obszar komory,
- nieodporne (niehermetyczne) na awaryjne zalanie ściekami silniki pomp, które przestały pracować po ich zalaniu.

- awarie rurociągu przesyłowego tłoczącego ścieki bytowe, komunalne, przemysłowe, w tym różnego rodzaju wody do oczyszczalni „Czajka" w Warszawie (Polska, 6 grudnia 2020 r. oraz 29 sierpnia 2022 r.)

Przyczyną pierwszej awarii rurociągu „Czajka" było rozszczelnienie połączenia rurociągu, w rejonie zasyfonowanej rury stalowej, która łączyła się z rurociągiem z tworzywa sztucznego wzmacnianego włóknem szklanym (GRP) biegnącym 11 metrów

pod rzeką Wisłą (tj. niefabryczny łącznik między rurociągiem stalowym a rurociągiem z GRP). Awarii uległy dwie nitki powyższej sieci; jedna z nitek była rurociągiem awaryjnym. W wyniku nieszczelności i braku odbioru ścieków powstało duże ciśnienie; wtenczas nastąpiła awaria ww. dwóch nitek kolektorów. Powyższa instalacja techniczna pracowała od 2012 roku.

Druga awaria na ww. sieci nastąpiła w dniu 29 sierpnia 2022 roku. Według ekspertów przyczyną był brak zaprojektowanego i wybudowanego odpowiedniego drenażu, który pozwoliłby na odprowadzenie nadmiaru wody i ścieków z przestrzeni otaczającej rurociągi, co uniemożliwiłoby osiągnięcie niebezpiecznego ciśnienia generowanego ciśnieniem z rurociągu syfonu. Wskutek braku takiego drenażu, wyciek ścieków z rurociągu wytworzył krytyczny poziom ciśnienia na zewnątrz nitki B. Doprowadziło to do jej lokalnego zniszczenia. Gwałtowny wyciek ścieków wyniósł płytę dociążającą i dokonał wielu zniszczeń, a także uszkodził nitkę A rurociągu.

Kolejna ekspertyza potwierdziła również konieczność całkowitego demontażu rurociągów znajdujących się w tunelu. Raport z ekspertyzy z 2019 roku potwierdził m.in. błędy w wykonaniu, a raport z awarii z 2020 roku wskazywał błędy w projektowaniu. Zastosowano alternatywne działania przyczyniające się do sprawnego tymczasowego działania odprowadzania ścieków poprzez zbudowanie przez Wojsko Polskie mostu pontonowego, na którym ułożono tymczasowy kolektor przesyłowy na długości 2,2 km z rur tworzywa sztucznego PEHD o średnicy DN 1000 mm w zaledwie 8 dni. Każda nitka była o długości L= 1100 m. Zastosowano zgrzewanie doczołowe, co zapewnia zachowanie jednolitej wytrzymałości konstrukcji na całej jej długości. Łącznie wykonano 146 zgrzewów. Po awarii w 2020 roku, na podstawie decyzji nakazowej PINB, przystąpiono do prac naprawczych i budowy nowego układu przesyłowego. Pierwsza nitka nowego układu pracuje od grudnia 2020 roku, zaś druga od czerwca 2021 roku. Były również prowadzone prace związane z wykonaniem sieci i obiektów łączących wykonane rurociągi pod Wisłą z Zakładami „Świderska" i „Farysa".

- rozszczelnienie rurociągu przesyłowego „Przyjaźń" (Polska, 6 grudnia 2022 r.)

Z uwagi na rozszczelnienie w dniu 6 grudnia 2022 roku rurociągu przesyłowego „Przyjaźń" w okolicach Pniew (woj. Wielkopolskie), nastąpił wyciek na drodze krajowej nr 92. Po zidentyfikowaniu miejsc awarii (rozszczelnień), w szczególności miejsc, które znajdują się w przepuście pod wyżej wymienioną drogą, przystąpiono do działań

naprawczych zgodnie z procedurą przewidzianą dla tego typu sytuacji. Po przygotowaniu miejsca naprawy opróżniono rurociąg z surowca, następnie fragment nieszczelnego rurociągu wymieniono na nowy. Nie wystąpiło bezpośrednie zagrożenie dla mieszkańców.

- rozszczelnienie rurociągu tłoczącego „Przyjaźń" (Polska, 6 sierpnia 2023 r.)

W gminie Chodecz w województwie kujawsko-pomorskim, 6 sierpnia 2023 roku, został uszkodzony fragment drugiego rurociągu magistrali tłoczącej ropę naftową. Przyczyną awarii była najprawdopodobniej korozja sieci.

- rozszczelnienie rurociągu tłoczącego „Przyjaźń" (Polska, 2 grudnia 2024 r.)

W okolicach Pniew w województwie Wielkopolskim nastąpił wyciek ropy naftowej na drogę krajową nr 91. Najprawdopodobniej przyczyną rozszczelnienia była korozja rurociągu. Konieczna była wymiana uszkodzonego, pękniętego rurociągu w przepuście pod drogą.

Wykaz zarejestrowanych zdarzeń o znamionach awarii i/lub poważnej awarii i ich skutków w latach 2019÷2023 w różnych miejscowościach w Polsce został przedstawiony w formie tabelarycznej w Załączniku Z.1.

2.5. Metody wykrywania awarii

Do oceny i kontrolowania jakości materiałów, w tym przede wszystkim instalacji technologicznej rurociągów, służą badania nieniszczące NDT (Non-Destructive Testing). Badania nieniszczące pozwalają na wykrywanie wad bez konieczności niszczenia lub wprowadzania zmian w kontrolowanych obiektach/elementach. Wyróżnia się szereg metod kontroli, a wybór konkretnego sposobu badania jest uzależniony od typu konstrukcji. Często łączy się kilka technik, aby ostatecznie uzyskać wiarygodne wyniki badań.

Do podstawowych badań nieniszczących zalicza się (Sobczykiewicz i in., 2007; Pilarczyk, 2017; www.ultrarent.pl, www.navitest.com.pl):

- **badania wizualne VT** – bez wykorzystania dodatkowych narzędzi,
- **badania magnetyczno-proszkowe MT** – bazujące na indukowaniu pola magnetycznego w obszarze badanego obiektu i obserwacji zmian w polu

wynikających z wad magnetycznych; kontrola odbywa się również przy użyciu proszku ferromagnetycznego,

- **badania penetracyjne PT** – w których wykorzystuje się barwnik penetracyjny, który wnika do powierzchniowych wad, ułatwiając ich detekcję,
- **badania ultradźwiękowe UT** – wykorzystujące fale ultradźwiękowe do penetracji przez materiał; wykrywanie wad opiera się na analizie odbitego lub rozproszonego sygnału ultradźwiękowego,
- **ultradźwiękowe pomiary grubości materiału UTT** – stosowane do określania rzeczywistej grubości badanego obiektu,
- **badania radiograficzne RT** – polegające na przechodzeniu promieni rentgenowskich lub gamma przez badany obiekt; uznawane za jedne z najbardziej dokładnych badań,
- **badanie przeprowadzone za pomocą radiografii cyfrowej bezpośredniej DR** – wykorzystujące detektory cyfrowe, dzięki którym obraz jest wyświetlany bezpośrednio na ekranie komputera,
- **badanie metodą pęcherzykową LT** – wykorzystujące ramkę do badań szczelności, pompę próżniową oraz dodatkową armaturę, taką jak manometr czy zawór odcinający,
- **badania prądami wirowymi ET** – wykorzystujące prądy wirowe, zwłaszcza w metalach przewodzących prąd,
- **drony, roboty, kamery, sondy**, itp.

Wybór konkretnej metody badawczej jest uzależniony od rodzaju materiału, który będzie poddawany kontroli. Niewątpliwie pierwszą techniką jest badanie wizualne, a następnie możliwe jest wskazanie innych technik, które można zastosować aby zweryfikować jakość badanego materiału, a tym samym z wyprzedzeniem wykryć możliwe nieprawidłowości, które mogą doprowadzić do stanu awarii na rurociągach i pozostałej instalacji technologicznej.

Celem wykonania **badań wizualnych VT** jest wykrycie nieciągłości materiałowych, takich jak pęknięcia, kratery, porowatość, podtopienia, rozprysk, wklęśnięcia lica i grani, nieregularny kształt spoiny, nieodpowiednie wymiary złącza oraz przesunięcie brzegów spawanego materiału (Czuchryj i Sikora, 2009). Badania wizualne VT spoin znajdują zastosowanie do kontrolowania złączy spawanych każdego typu. Wykonuje się je bardzo szybko oraz w takim stanie jak je wykonano. Badania wizualne pozwalają na (www.ultrarent.pl):

- detekcję pęknięć, zarówno na powierzchni, jak i wewnątrz materiału,
- ocenę czy spoina jest poprawnie i w pełni spenetrowana, co jest istotne dla trwałości połączenia spawalniczego,
- ocenę kształtu spoiny i identyfikację niezgodności z wymaganiami projektowymi,
- identyfikację wtrąceń w procesie spawania,
- ocenę stopnia korozji na powierzchni badanego elementu,
- identyfikację wad powierzchniowych, takich jak zadrapania, naddarcia i inne ubytki widoczne gołym okiem,
- identyfikację nieprawidłowości związanych z przygotowaniem powierzchni przed spawaniem, takich jak obecność zanieczyszczeń, farby czy rdzy.

Do badań wizualnych VT bezpośrednich przy użyciu gołego oka, a także za pomocą prostych narzędzi można wykorzystywać różne przyrządy, takie jak: lupy, lusterka teleskopowe, lampy błyskowe, latarki diodowe, lusterka ułatwiające inspekcję, miarki i szablony, markery do oznaczania wad, różne narzędzia ręczne (młotki, kleszcze, śrubokręty, itp.).

Badania magnetyczno-proszkowe MT polegają na wzbudzaniu w badanym elemencie pola magnetycznego i poszukiwaniu tzw. lokalnych, magnetycznych pól rozproszenia, które powstają na powierzchni badanego elementu w miejscu występowania lub bezpośredniej bliskości niezgodności spawalniczych. Wykrycie magnetycznych pól rozproszenia jest możliwe dzięki zastosowaniu detektora w postaci drobnoziarnistego, ferromagnetycznego proszku, nanoszonego na badaną powierzchnię podczas jej magnesowania. Skupiska proszku pozwalają na odwzorowanie przybranym kształtem rzeczywistego kształtu nieciągłości materiałowych, będących powodem do występowania defektogramów proszkowych. Za pomocą badań magnetyczno-proszkowych można dokonać kontroli spoin doczołowych i kątowych, złączy spawanych, odlewów oraz odkuwek.

Badania magnetyczno-proszkowe MT pozwalają na bardzo precyzyjne wykrywanie niezgodności powierzchniowych oraz niezgodności zlokalizowanych pod badaną powierzchnią na głębokości kilku milimetrów. Jednak w przypadku wykrywania nieciągłości pod powierzchnią, mamy do czynienia z obniżoną wykrywalnością, przez co należy do badań tych zachować ograniczone zaufanie i sprawdzić czułość badania na wzorcach i próbkach kontrolnych.

Badania magnetyczno-proszkowe MT pozwalają na (www.ultrarent.pl):

- wykrycie niezgodności takich jak: wszelkiego typu pęknięcia, naderwania, zakucia, zawalcowania, łuski, wtrącenia niemetaliczne,
- wykrycie niezgodności, które nie są nieciągłościami powierzchniowymi otwartymi (np. pęknięcia wypełnione żużlem lub innymi zanieczyszczeniami) i tym samym umożliwiają wnikanie penetranta,
- wykrycie niezgodności wychodzących na powierzchnię, które zostały zatarte, zakryte lub zatkane przez zanieczyszczenia,
- wykrycie niezgodności zlokalizowanych pod powierzchnią badanego elementu,
- kontrolę powierzchni pokrytej cienką warstwą farby,
- szybsze przeprowadzenie badania i wykrycie nieciągłości oraz łatwą interpretację uzyskanych wskazań.

Najczęściej kontrolę magnetyczną wykonuje się po przeprowadzeniu badań wizualnych oraz usunięciu wykrytych niezgodności. Badania magnetyczno-proszkowe pozwalają na wykrycie nieciągłości niewidocznych gołym okiem. Są one wykorzystywane zazwyczaj wyłącznie do wykrywania nieciągłości powierzchniowych.

Badania penetracyjne PT należą do najstarszych badań nieniszczących. Wykorzystuje się je do kontroli zarówno metali, jak i materiałów niemetalowych. Jest to bezciśnieniowa metoda, wykorzystująca zjawisko włoskowatości, pozwalające na wnikanie penetranta w bardzo wąskie przestrzenie. Jest to bardzo skuteczna i uniwersalna metoda kontrolna badania szczelności spoin. Badanie penetracyjne spoin przeprowadza się zazwyczaj po wykonaniu badań wizualnych i usunięciu z powierzchni niezgodności.

Do wykonywania badania penetracji należy stosować odpowiednie zestawy preparatów, takich jak penetrant do badania spoin, zmywacz do penetranta oraz wywoływacz chłonący penetrant.

Badania penetracyjne pozwalają na (www.ultrarent.pl):

- wykrycie niezgodności spawalniczych, takich jak pęknięcia, przyklejenia brzegowe, porowatość, podtopienia,
- kontrolę wszelkiego typu złączy spawanych (spawów i spoin), odlewów i odkuwek wykonanych m.in. ze stali stopowych, niestopowych, staliwa, żeliwa, aluminium, miedzi oraz tytanu.

Badania ultradźwiękowe UT dostarczają informacji o stanie w jakim znajduje się cała objętość kontrolowanego elementu. Dzięki nim można wykryć oraz określić ilość, wielkości i rozmieszczenia nieciągłości zlokalizowanych wewnątrz materiału. W badaniach ultradźwiękowych wykorzystuje się zjawisko rozchodzenia się fal

o częstotliwości większej niż górna granica słyszalności ucha ludzkiego. Badanie ultradźwiękowe przeprowadza się za pomocą defektoskopu, którego zadaniem jest wzbudzenie drgań w głowicy pełniącej funkcję nadajnika oraz detektora. Jeżeli w badanym elemencie wytworzona fala napotka nieciągłości materiałowe, to wtedy wiązka ulegnie odbiciu, a następnie wróci do głowicy, przesyłając sygnał do defektoskopu, który powoduje powstawanie impulsu świetlnego na ekranie. Biorąc pod uwagę odległości między impulsem echa niezgodności a impulsem początkowym ustala się położenie oraz głębokość zalegania nieciągłości (www.ultrarent.pl).

Ultrasonografia pozwala na wykrywanie wad, takich jak pęknięcia, pory, niewłaściwe penetracje spoiny, co jest kluczowe dla zapewnienia trwałości i bezpieczeństwa konstrukcji. Dzięki badaniom ultradźwiękowym można uniknąć potencjalnych awarii spoin, co ma szczególne znaczenie w przypadku konstrukcji używanych w warunkach ekstremalnych, takich jak w przemyśle naftowym, gazowniczym i lotniczym.

Badania szczelności metodą ultradźwiękową uważa się za szczególnie przydatne, gdy grubość elementów jest większa niż 8 mm. Należy dodać, że podczas badania ultradźwiękowego UT osiąga się największą wykrywalność nieciągłości płaskich, takich jak pęknięcia, przyklejenia i braki przetopu oraz rozwarstwienie materiałowe. Badania nieniszczące UT stosuje się do pomiaru grubości urządzeń będących w ciągłej eksploatacji, czyli np. dla infrastruktury technicznej rurociągów KGHM Polska Miedź.

Podczas stosowania badań ultradźwiękowych UT można wyróżnić następujące techniki: metodę echa, metodę przepuszczania i metodę rezonansu.

Dla elementów o grubości od 2 do 8 mm ma zastosowanie **procedura IBUS-TD badań ultradźwiękowych**. Procedura wykorzystuje zebrane w przemyśle energetycznym doświadczenia oraz wyniki otrzymane podczas porównawczych badań metalograficznych. Badanie jest zalecane w sytuacji, gdy należy przeprowadzić kontrolę dużej liczby złączy spawanych w krótkim przedziale czasowym, jak również w sytuacji, gdzie grubość badanych elementów nie przekracza 8 mm.

Badanie ultradźwiękowe według instrukcji IBUS-TD ma charakter porównawczy. Metoda polega na porównaniu wskazań powstałych z odbicia od wady rzeczywistej ze wskazaniami otrzymanymi z wady sztucznej. Wada sztuczna to najczęściej otwór referencyjny o średnicy 1,0 mm, usytuowany prostopadle do badanej powierzchni. Wielkość otworu referencyjnego została ustalona na podstawie wieloletnich doświadczeń. Krzywa DAC (Distance Amplitude Correction), wyznaczona na podstawie otworu

przelotowego służy do porównania wskazań. Wskazania przekraczające krzywą DAC są niedopuszczalne oraz kwalifikują obszary ich występowania jako wadliwe.

Należy dodać, że tworzenie krzywej DAC odbywa się poprzez zapis amplitud pochodzących z ech otworu referencyjnego dla różnych odległości. Krzywą DAC otrzymuje się poprzez połączenie za pomocą linii otrzymanych punktów (Samolczyk, 2005). Po wyznaczeniu krzywej można przystąpić do badania.

Zaletami badania ultradźwiękowego IBUS-TD są (www.ultrarent.pl):

- duża wydajność badania,
- natychmiastowy wynik badania,
- możliwość zastosowania każdego typu defektoskopu posiadającego możliwość wykreślenia krzywej DAC,
- uproszczony raport z badania.

Badania nieniszczące ultradźwiękowe, ze względu na dokładność, szybkość badania oraz otrzymywanie wyników badania zaraz po zakończeniu kontroli, mogą być wykorzystywane do okresowego monitorowania stanu występujących nieciągłości na pracujących rurociągach. Pozwalają na diagnostykę i monitorowanie występującej korozji bądź osadów w pracujących instalacjach technologicznych. Za pomocą badań ultradźwiękowych można tworzyć tzw. mapy korozji, które pozwolą określić miejsca, w których dochodzi do zmian grubości czy występowanie wżerów. Mapowanie korozji wykorzystywane jest w badaniach rurociągów, które nie są izolowane. W przypadku rurociągów z izolacją, najlepszą techniką będzie radiografia cyfrowa, która umożliwia badanie rurociągów przez izolację.

Zaletami badań ultradźwiękowych są (www.navitest.com.pl):

- duża skuteczność wykrywania nieciągłości,
- łatwość i powtarzalność przeprowadzania badania,
- możliwość badania elementów o znacznej grubości bez widocznego wpływu na szybkość wykonania badania,
- natychmiastowy wynik badania.

Dla badań nieniszczących ultradźwiękowych opracowano wiele norm. Do najważniejszych, stosowanych w badaniach rurociągów, należą:

- PN-EN ISO 5577:2017-04 Badania nieniszczące. Badania ultradźwiękowe. Terminologia
- PN-EN ISO 17640:2019-01 Badania nieniszczące złączy spawanych. Badania ultradźwiękowe złączy spawanych. Techniki, poziomy badania i ocena

- PN-EN ISO 11666:2018-04 Badania nieniszczące złączy spawanych. Badania ultradźwiękowe złączy spawanych. Poziomy akceptacji
- PN-EN ISO 23279:2017-11 Badania nieniszczące spoin. Badania ultradźwiękowe. Charakterystyka wskazań w spoinach
- PN-EN ISO 16810:2014-06 Badania nieniszczące. Badania ultradźwiękowe. Część 1: Zasady ogólne
- PN-EN 10307:2004 Badania nieniszczące. Badania ultradźwiękowe wyrobów płaskich ze stali nierdzewnej austenitycznej i austenityczno-ferrytycznej o grubości równej lub większej niż 6 mm (metoda echa)
- PN-EN ISO 10893-8:2011 Badania nieniszczące rur stalowych. Część 8: Automatyczne badanie ultradźwiękowe rur stalowych bez szwu i spawanych w celu wykrycia rozwarstwień
- PN-EN ISO 10893-8:2011/A1: 2020-12 Badania nieniszczące rur stalowych. Część 8: Automatyczne badanie ultradźwiękowe rur stalowych bez szwu i spawanych w celu wykrycia rozwarstwień
- PN-EN ISO 10893-10:2011 Badania nieniszczące rur stalowych. Część 10: Automatyczne ultradźwiękowe badanie rur stalowych bez szwu i spawanych (z wyłączeniem rur spawanych łukiem krytym) w celu wykrycia nieciągłości wzdłużnych i/lub poprzecznych
- PN-EN ISO 10893-11:2011 Badanie nieniszczące rur stalowych. Część 11: Automatyczne badanie ultradźwiękowe spoin rur stalowych spawanych w celu wykrycia nieciągłości wzdłużnych i/lub poprzecznych,
- PN-EN ISO 16828:2014-06 Badania nieniszczące. Badania ultradźwiękowe. Dyfrakcyjna technika czasu przejścia jako sposób wykrywania i wymiarowania nieciągłości
- PN-EN ISO 10863:2020-12 Badania ultradźwiękowe. Zastosowanie techniki dyfrakcji fal ultradźwiękowych (TOFD)
- PN-EN ISO 15626:2018-10 Badania nieniszczące. Technika czasu przejścia wiązki dyfrakcyjnej (TOFD). Poziomy akceptacji

Ultradźwiękowe pomiary grubości materiału UTT należą do badań nieniszczących i są stosowane do określania rzeczywistej grubości badanych elementów, jak również do monitorowania skutków korozji, erozji, ubytków, zużycia materiału czy uszkodzeń. Badanie to wykorzystywane jest m.in. dla badania rurociągów, zbiorników ciśnieniowych, instalacji przemysłowych (www.ultrarent.pl). Wykrywanie ubytków

materiału spowodowanych korozją, erozją czy też zużyciem eksploatacyjnym ma kluczowe znaczenie dla zapewnienia ciągłości użytkowania badanego elementu.

Ultradźwiękowe pomiary grubości opierają się na dokładnym pomiarze czasu, w jakim impuls ultradźwiękowy generowany przez przetwornik zlokalizowany w głowicy badawczej przechodzi przez badaną grubość, a po odbiciu od powierzchni przeciwległej do niej powraca. Po zmierzeniu czasu grubościomierz ultradźwiękowy dokonuje obliczenia grubości materiału i wyświetla wynik na ekranie cyfrowego defektoskopu.

Ultradźwiękowy pomiar grubości materiału UTT ma wiele zalet, m.in. (www.ultrarent.pl):

- nie powoduje uszkodzenia badanej powierzchni,
- nie wymaga dostępu z obu stron do badanego elementu,
- istnieje możliwość wykonania pomiarów przez powłoki,
- pomiar odznacza się dużą dokładnością pomiarową,
- istnieje możliwość badania różnego rodzaju materiałów.

Pomimo licznych zalet, ograniczeniami w tym badaniu są:

- brak możliwości badania powierzchni skorodowanych,
- konieczność demontażu izolacji,
- konieczność usuwania grubych lub łuszczących się powłok,
- wymóg kalibracji dla każdego materiału,
- wymóg dobrego kontaktu z materiałem badanym,
- punktowy pomiar,
- ograniczone możliwości badania instalacji o podwyższonej temperaturze.

Badania radiograficzne RT należą również do badań nieniszczących, w których wykrywanie nieciągłości materiałowych opiera się na zjawisku zmiany natężenia promieniowania docierającego do detektora po przejściu przez badany element, w którym wszelkiego rodzaju defekty tworzą obszary o różnej grubości. Badania RT spoin polegają na prześwietlaniu badanego elementu za pomocą wiązki promieniowania jonizującego (gamma lub X), które jest emitowane przez lampę rentgenowską lub pierwiastek promieniotwórczy (izotop), taki jak selen, iryd, kobalt lub cez (www.ultrarent.pl).

Różnice w absorpcji promieniowania przenikające przez badany element powodują powstawanie obrazu elementu na błonie fotochemicznej lub płycie cyfrowej, które pełnią funkcję detektora. Następnie, po przeprowadzeniu odpowiedniej obróbki, otrzymuje się wyraźny obraz zbadanego przedmiotu, czyli radiogram, na którym istnieje dwuwymiarowy, płaski obraz stanowiący rzut badanego elementu – całości lub jego

fragmentu. Badanie radiograficzne RT jest stosowane do każdego typu wyrobu. Dobrze sprawdza się podczas badania złączy i spawów ze spoinami czołowymi. Można to badanie również zastosować do kontroli spoin pachwinowych. Podczas oceny możliwości zbadania danego elementu za pomocą radiografii, należy wziąć pod uwagę przede wszystkim grubość badanego elementu, rodzaj materiału, niezgodności jakie chcemy wykryć oraz geometrię elementu badań. Dzięki badaniom radiograficznym spoin można zidentyfikować różne ich wady, takie jak: pęknięcia, pory, niejednorodności czy niewłaściwe penetracje spoiny. Radiografia umożliwia precyzyjną ocenę jakości penetracji spoiny, co jest ważne dla zapewnienia trwałego i bezpiecznego połączenia. Pozwala również na wykrycie wad ukrytych wewnątrz materiałów, które są trudno zauważalne na zewnątrz.

Badania radiograficzne są używane również do pomiaru grubości materiałów, co jest bardzo istotne w przypadku elementów, gdzie dokładna znajomość grubości jest niezbędna ze względów bezpieczeństwa i trwałości.

Tradycyjna radiografia analogowa sprawdza się doskonale podczas inspekcji terenowych rurociągów oraz urządzeń ciśnieniowych. Nowoczesne techniki badawcze, takie jak DR – radiografia cyfrowa oraz CR – radiografia komputerowa, ze względu na większą wrażliwość na uszkodzenia i zanieczyszczenia nie zawsze nadają się do pracy w terenie.

Badania radiograficzne RT pozwalają na wykrywanie następujących niezgodności (www.ultrarent.pl): braku przetopu, pęcherzy, pęknięć, wtrąceń niemetalicznych (żużli), przyklejeń brzegowych, podtopień lica i grani.

Badania radiograficzne zaliczane są do najbardziej wiarygodnych metod badawczych w spawalnictwie. Nawet w przypadku niewielkich nieciągłości mamy dużą wykrywalność wad i jednoznaczną ich interpretację.

Do badań nieniszczących, które można zastosować do kontroli rurociągów zalicza się również **badanie przeprowadzane za pomocą radiografii cyfrowej bezpośredniej DR**. W badaniu wykorzystuje się detektory cyfrowe, za pomocą których obraz po przetworzeniu jest wyświetlany bezpośrednio na ekranie komputera bez konieczności obróbki fotochemicznej oraz pośredniego skanowania. Obrazy można przetwarzać, ulepszać oraz powiększać w celu oceny otrzymanych wyników (www.ultrarent.pl).

Jedną z głównych zalet radiografii cyfrowej jest możliwość tworzenia obrazów radiograficznych przy użyciu do 80% mniej promieniowania niż w przypadku radiografii

konwencjonalnej. Dzięki temu radiografia cyfrowa jest bezpieczniejsza niż radiografia analogowa. Skraca się również czas potrzebny do wykonania badań.

W badaniu z wykorzystaniem radiografii cyfrowej DR są tworzone zdjęcia radiograficzne bez użycia błon. Podczas badania są wykorzystywane te same źródła promieniowania X lub gamma, ale obraz jest rejestrowany na detektorze cyfrowym wielokrotnego użytku a następnie przesyłany do komputera za pomocą przewodu lub Wi-Fi. Otrzymany obraz cyfrowy można edytować, przesyłać i udostępniać za pomocą elektronicznych kanałów komunikacji. Radiografia cyfrowa bezpośrednia DR może być zastosowana w wielu gałęziach przemysłu, zwłaszcza do oceny stanu technicznego rurociągów, zbiorników ciśnieniowych oraz zaworów. Umożliwia wykrywanie nieciągłości wielu materiałów, takich jak stal, aluminium, żeliwo, tworzywo sztuczne, kompozyty. Radiografia cyfrowa umożliwia kontrolę rurociągów pod kątem zużycia korozyjnego oraz pomiaru grubości ścianek rurociągu, bez konieczności usuwania izolacji. Do najważniejszych zalet badania przeprowadzonego za pomocą radiografii cyfrowej bezpośredniej można zaliczyć: krótsze czasy ekspozycji, natychmiastowe uzyskanie wyników, lepszą wykrywalność defektów, brak konieczności wykonywania obróbki fotochemicznej błon, przechowywanie radiogramów w formie cyfrowej, mniejsze zagrożenie dla środowiska, brak odpadów w postaci błon oraz chemii do obróbki. Do wykrywania nieszczelności spoin i złączy spawanych można zastosować **badanie metodę pęcherzykową LT**. Wycieki z instalacji przemysłowych mogą występować we wszystkich formach; jednak najczęściej pojawiają się wycieki czynnika w fazie gazowej. Przyczynami wycieków może być niekontrolowana korozja, zużycie eksploatacyjne oraz niezgodności stanowiące pozostałości po etapie wytwarzania. Nieszczelności występują głównie w obszarach połączeń spawanych, lutowanych oraz wad materiału rodzimego.

W badaniu metodą pęcherzykową wykorzystuje się ramkę do badań szczelności, pompę próżniową oraz dodatkową armaturę, taką jak manometr czy zawór odcinający. Ramka zostaje podłączona bezpośrednio za pomocą węża do pompy próżniowej wytwarzającej podciśnienie, a na badany obszar jest nakładany roztwór detergentu. Podczas wytwarzania podciśnienia należy uważnie obserwować odcinek badanej spoiny. W przypadku wystąpienia nieszczelności pęcherzyki powietrza ujawniają jej obecność oraz umożliwiają jej lokalizację.

Do najważniejszych zalet techniki LT można zaliczyć (www.ultrarent.pl):

- szybkość przeprowadzenia badania,

- prosty w obsłudze sprzęt badawczy,
- uzyskanie natychmiastowego wyniku badań wraz z dokładnym określeniem lokalizacji ewentualnych nieszczelności,
- możliwość wykrycia nawet niewielkich wycieków,
- dostęp do badanego elementu tylko z jednej strony,
- brak konieczności czyszczenia powierzchni po badaniu.

Do wykrywania wad i nieciągłości materiałowych można wykorzystać również **badania wiroprądowe ET**, które opierają się na zjawisku indukcji magnetycznej. Podczas tych badań, specjalnie zaprojektowana cewka, pełniąca funkcję sondy, która jest zasilana prądem przemiennym, zostaje umieszczona w pobliżu badanej powierzchni wytwarzając zmienne pole magnetyczne, które oddziałuje na badany materiał wytwarzając w jego pobliżu prądy wirowe (www.ultrarent.pl).

Wszelkie zmiany w przewodności badanego materiału, takie jak wady powierzchniowe czy różnice grubości, wpływają na wartość prądu wirowego. Każda zmiana jest wykrywana za pomocą cewki, a następnie wyświetlana na ekranie defektoskopu. Aby uzyskać dużą czułość wykrywania nieciągłości powierzchniowych niezbędne jest zastosowanie stosunkowo dużych częstotliwości pracy przetwornika. Im wyższa jest częstotliwość pracy przetwornika sondy, tym mniejsza jest głębokość wnikania prądów wirowych do badanego elementu.

Badania wiroprądowe ET znajdują zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, m.in. do kontroli złączy spawanych. Dużą zaletą tych badań jest możliwość automatyzacji, przez co są one stosowane w wielu procesach produkcyjnych, np. do kontroli rur. Do najważniejszych zalet tych badań zalicza się:

- możliwość wykrywania wad powierzchniowych i podpowierzchniowych,
- wykrywanie nieciągłości poprzez warstwy i powłoki ochronne,
- wykonywanie badań na obiektach o podwyższonej temperaturze i na obiektach o złożonej geometrii,
- lekką, przenośną aparaturę oraz natychmiastową interpretację wyników badań.

2.6. Wykorzystanie metody elementów skończonych MES do analizy awarii

Metoda elementów skończonych MES to technika numeryczna, która służy do modelowania zachowania się obiektów fizycznych w warunkach obciążeń. MES wykorzystywane jest w wielu dziedzinach nauki i techniki, w tym m.in. w inżynierii

lądowej i wodnej (Zienkiewicz, 1972). MES pozwala na rozwiązywanie różnych problemów matematycznych, takich jak równania różniczkowe, równania ruchu, równania przewodnictwa cieplnego, równania mechaniczne i wiele innych. MES jest szczególnie skuteczny w przypadku problemów, których rozwiązanie analityczne jest niemożliwe lub bardzo trudne do uzyskania.

Analiza MES wymaga określenia geometrii, materiałów i warunków brzegowych struktury, a następnie podzieleniu całego obszaru analizy na małe elementy skończone, które są analizowane oddzielnie. Każdy element skończony składa się z węzłów, w których są obliczane wartości rozwiązania. Rozwiązanie tego układu równań pozwala na określenie przemieszczeń, odkształceń i naprężeń w całej strukturze (www.komes.pl).

Analizy przeprowadzane z wykorzystaniem MES dotyczące infrastruktury technicznej hydrotransportu przeprowadza się głównie w celu:

- określenia obszarów narażonych na przeciążenia i potencjalne uszkodzenia,
- oceny wpływu uszkodzeń powstałych w wyniku korozji, takich jak pęknięcia, rozerwania, wytrzymałość/trwałość instalacji hydrotransportu,
- optymalizacji konserwacji, polegającej na opracowaniu najbardziej krytycznych obszarów do monitorowania i zabezpieczenia,
- weryfikacji projektów, tj. identyfikacji potencjalnych problemów, które mogą prowadzić w przyszłości do awarii.

Bazując na wynikach analiz prowadzonych z wykorzystaniem MES można skuteczniej weryfikować projekty dla sieci rurociągów jeszcze przed ich realizacją. W tym celu przeprowadza się symulacje obciążeń dla rzeczywistych warunków obciążeniowych, które pokazują, jak projektowana instalacja zachowa się pod wpływem różnych wartości sił i różnych czynników. Można też zlokalizować słabe punkty, czyli obszary podatne na uszkodzenia.

Metoda elementów skończonych umożliwia również analizę różnych materiałów i złożonej geometrii (różnych kształtów infrastruktury technicznej), co pozwala na najkorzystniejszy wybór rozwiązań projektowych pod względem wytrzymałości, uszkodzeń struktury instalacji, a tym samym minimalizację kosztów ewentualnych awarii związanych z korozją, pęknięciami, itp. (Vieira i in., 2016).

Można wykorzystać MES do przeprowadzenia analiz dynamicznych, które dotyczą instalacji narażonych na zmienne obciążenia, powstałe np. od uderzeń hydraulicznych czy wibracji. Niewątpliwie, zastosowanie metody elementów skończonych do analiz stanu technicznego infrastruktury technicznej rurociągów, może zminimalizować ryzyko awarii

na sieci technologicznej hydrotransportu, a tym samym zwiększyć bezpieczeństwo całej instalacji.

2.7. Wykorzystanie sztucznej inteligencji do wykrywania wycieków

Inżynierowie firmy PSI Polska (www.magazynit.pl) pracują nad technologią, która ma pomóc w dokładnej detekcji i lokalizacji wycieków rurociągów przesyłających mieszaninę ropy i gazu. Awarie te są niezwykle szkodliwe dla środowiska i generują znaczące straty dla firm, a przy tym stanowią zagrożenie dla mieszkańców, grożąc m.in. emisją toksycznego siarkowodoru. Projekt firmy PSI Polska wykorzystujący sztuczną inteligencję jest testowany przez jednego z operatorów rurociągów wielofazowych. Technologia ta ma 10-krotnie wyższą skuteczność niż stosowane do tej pory rozwiązania wizyjne. Głównym celem tego wdrożenia jest opracowanie systemu identyfikacji nieszczelności, który będzie miał za zadanie wspomagać operatorów rurociągów w szybkim wykrywaniu oraz w precyzyjnym lokalizowaniu wycieków. Bez wątpienia wdrożenie technologii przyczyni się do uzyskania istotnych oszczędności z punktu widzenia operatorów i ochrony zasobów środowiska naturalnego.

Projekt obejmuje cztery etapy prac. Pierwszy etap wymagał skonstruowania układu monitorującego wycieki, jego instalację oraz zbieranie danych. W drugim etapie są wytwarzane algorytmy i testowane rozwiązania na działającym rurociągu. Etap trzeci to praca nad Centralnym Repozytorium Danych CRD oraz Centrum Usług Analitycznych CUA, po to aby powstał punkt zbiorczy wszystkich danych, które można wykorzystać do trenowania modeli na potrzeby innych rurociągów. Etap czwarty to optymalizacja rozwiązania. Centralne Repozytorium Danych CRD ma za zadanie gromadzenie danych pomiarowych i ciągłe utrzymywanie modeli predykcyjnych wspierających algorytm LDS. Prowadzi to do minimalizacji liczby fałszywych alarmów. W założeniach Centralne Repozytorium Danych CRD stanowi w pełni zautomatyzowany mechanizm, który nie wymaga ingerencji człowieka. Natomiast celem Centrum Usług Analitycznych CUA jest wprowadzenie zaawansowanej algorytmiki predykcyjnej, rozszerzającej system LDS o elementy predykcyjnego oraz nakazowego utrzymania infrastruktury.

Działanie systemu wykorzystuje metodę opartą o precyzyjny pomiar ciśnienia dynamicznego wsparty pomiarami emisji akustycznej. Wykorzystywane są odpowiednio dobrane przetworniki ciśnienia oraz przetworniki emisji akustycznej zwane hydrofonami, które dostarczają informacji z bardzo szerokiego zakresu częstotliwości dochodzącego do

100 kHz. Kiedy sztuczna inteligencja „usłyszy" problem, szybko znajdzie jego lokalizację na podstawie analizowanych w czasie rzeczywistym sygnałów.

W określonych od siebie odstępach montowane są przetworniki monitorujące ciśnienie w rurociągach. Na podstawie odczytów powstaje model, który określa poziomy ciśnienia nie tylko w punktach odczytowych, ale na długości całego rurociągu. Dane te są nieustannie monitorowane, a po wykryciu anomalii, problem lokalizowany jest z dokładnością do 50 m.

Wycieki będzie można wykrywać w czasie rzeczywistym, a odpowiedzialny za to będzie system prowadzący stały nadzór nad infrastrukturą przesyłową. Od strony technicznej system wykorzystuje elementy sztucznej inteligencji, takie jak zaawansowana analityka, różne formy uczenia maszynowego, oraz aplikacje chmurowe i kontenery dockerowe (www.magazynit.pl).

3. PRZEGLĄD AWARII INFRASTRUKTURY TECHNICZNEJ ODPADÓW POFLOTACYJNYCH I WODY PRZEMYSŁOWEJ W LATACH 2018÷2023

W rozdziale 3 zestawiono awarie infrastruktury technicznej tłoczącej odpady poflotacyjne na Obiekt Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych Żelazny Most oraz tłoczącej oczyszczoną wodę technologiczną pochodzącą z sedymentacji odpadów poflotacyjnych, w celu ponownego jej wykorzystania, do Zakładów Wzbogacania Rud bądź do Kopalni.

Zestawienie awarii infrastruktury technicznej odpadów poflotacyjnych oraz infrastruktury wodnej w latach 2018÷2023 przedstawiono w podziale na poszczególne rurociągi odpadów poflotacyjnych, tj. trzy rurociągi magistralne o średnicy DN 1000 mm o nazwie: R1, R2 i R3, oraz trzy rurociągi wodne o średnicy DN 1000 mm o nazwie: RW1, RW2 i RW4. W rozdziale tym zestawiono również awarie na instalacjach technologicznych zabudowanych w Pompowni Odpadów Poflotacyjnych w rejonie ZWR Rudna, ZWR Polkowice i ZWR Lubin, oraz awarii Lubińskich i Odrzańskich rurociągów technologicznych. W Tablicach 3.1÷3.15 przedstawiono lokalizację awarii, rodzaj awarii oraz wykonane czynności naprawcze. Dodatkowo, w Załączniku Z.2 na rysunkach zaznaczono miejsca, w których wystąpiły awarie infrastruktury technicznej odpadów poflotacyjnych i rurociągów technologicznych wody przemysłowej.

3.1. Zestawienie awarii rurociągu odpadów poflotacyjnych R1

Tablica 3.1. Zestawienie awarii rurociągu odpadów poflotacyjnych R1, DN 1000 mm, trasa od komory rozrządu RG w kierunku węzła B (dane źródłowe: Archiwum KGHM Polska Miedź S.A.)

Lp.	Data awarii	Lokalizacja awarii	Rodzaj awarii	Wykonane czynności naprawcze	Propozycja zastosowania metody naprawczej
1	08.02.2018	Rejon kompensatora K47/K48	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu oraz założono obejmę na rurociągu	Zmiana materiału rury stalowej na rurę stalową o lepszych parametrach ścieralnych. Zwiększenie klasy jakości połączeń spawanych. Użycie innego materiału rurociągu PEHD lub stali z wkładką trudnościeralną.
2	10.02.2018	Rejon kompensatora K48/K48	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wycięto i pospawano łatę stalową oraz założono obejmę na rurociągu	

3	15.02.2018	Rejon kompensatora K47/K48	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Założono obejmę na rurociągu	Zmiana materiału rury stalowej na rurę stalową o lepszych parametrach ścieralnych. Zwiększenie klasy jakości połączeń spawanych. Użycie innego materiału rurociągu PEHD lub stali z wkładką trudnościeralną.
4	14.06.2018	Rejon kompensatora K47/K48	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Założono obejmę na rurociągu	
5	29.06.2018	Rejon kompensatora K17/K18	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Założono obejmę na rurociągu	
6	14.07.2018	Rejon kompensatora K50/K51	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu oraz założono obejmę na rurociągu	
7	28.07.2018	Rejon kompensatora K40/K41	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Założono obejmę na rurociągu	
8	22.08.2018	Rejon kompensatora K59/K60	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu oraz założono obejmę na rurociągu	
9	24.08.2018	Kolano za węzłem „H”	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Założono obejmę na rurociągu	
10	26.08.2018	Wpięcie stalowe do zasuw B19 rejon węzła „B”	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Założono obejmę na rurociągu	
11	19.02.2019	Rejon kompensatora K49 – prostka kompensatora	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wymiana kompensatora	
12	25.03.2019	Rejon kolana stalowego na trasie kompensatora K40/K41	Pojawiły się dziury na rurze	Pospawano łaty doraźnie, montaż obejmy	
13	27.03.2019	Rejon kompensatora K47/K48/K52	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Pospawano łatę na rurociągu	
14	22.04.2019	Rejon podpory stałej przy kompensatorze K12/K13	Brak zastrzałów na podporze stałej	Pospawano nowe zastrzały	
15	24.04.2019	Rejon podpory stałej przy kompensatorze K11-K12	Brak zastrzałów na podporze stałej	Pospawano nowe zastrzały	
16	21.05.2019	Rejon kompensatora K47/K48	Pojawiły się dziury na rurze	Pospawanie łat stalowych na rurociągu	

17	02.12.2019	Rejon kompensatora K20 (wsuwka kompensatora)	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	I etap – założenie obejmy, II etap – wymiana kompensatora	Zmiana materiału rury stalowej na rurę stalową o lepszych parametrach ścieralnych. Zwiększenie klasy jakości połączeń spawanych. Użycie innego materiału rurociągu PEHD lub stali z wkładką trudnościeralną.
18	27.04.2020	Rejon kompensatora K54	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Założono obejmę na rurociągu	
19	29.09.2020	Rejon przepustu przy kompensatorze K40	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wymiana uszkodzonej rury stalowej	
20	17.09.2021	Rejon kompensatora K9	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wymiana uszkodzonej rury stalowej	
21	06.01.2023	Rejon za kolanem przed kompensatorem K41	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wymiana uszkodzonej rury stalowej	
22	15.09.2023	Rejon kompensatora K8	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wymiana odcinka rury na trasie od K7 do K9	

3.2. Zestawienie awarii rurociągu odpadów poflotacyjnych R2

Tablica 3.2. Zestawienie awarii rurociągu odpadów poflotacyjnych R2, DN 1000 mm, trasa od komory rozrządu RG w kierunku węzła B (dane źródłowe: Archiwum KGHM Polska Miedź S.A.)

Lp.	Data awarii	Lokalizacja awarii	Rodzaj awarii	Wykonane czynności naprawcze	Propozycja zastosowania metody naprawczej
1	14.01.2018	Rejon kompensatora K53/K54	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu oraz założono obejmę na rurociągu	Zmiana materiału rury stalowej na rurę stalową o lepszych parametrach ścieralnych. Zwiększenie klasy jakości połączeń spawanych. Użycie innego materiału rurociągu PEHD lub stali z wkładką trudnościeralną.
2	14.01.2018	Rejon kompensatora K48/K49	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu oraz założono obejmę na rurociągu	
3	14.01.2018	Rejon kompensatora K38/K39	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu oraz założono obejmę na rurociągu	
4	23.01.2018	Rejon kompensatora K8/K9	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wycięto i pospawano łatę stalową oraz założono obejmę na rurociągu	
5	24.01.2018	Rejon kompensatora	Pojawiły się dziury na rurze	Wycięto i pospawano łatę	

		K60/K61	stalowej	stalową na rurociągu oraz założono obejmę na rurociągu	
6	26.01.2018	Rejon kompensatora K48/K49	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu oraz założono obejmę na rurociągu	
7	07.02.2018	Rejon kompensatora K53/K54	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu oraz założono obejmę na rurociągu	
8	08.02.2018	Rejon kompensatora K37/K38	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu oraz założono obejmę na rurociągu	
9	25.02.2018	Rejon kompensatora K51/K52	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu oraz założono obejmę na rurociągu	Zmiana materiału rury stalowej na rurę stalową o lepszych parametrach ścieralnych. Zwiększenie klasy jakości połączeń spawanych. Użycie innego materiału rurociągu PEHD lub stali z wkładką trudnościeralną.
10	13.05.2018	Rejon kompensatora K13/K14	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu oraz założono obejmę na rurociągu	
11	24.05.2018	Rejon kompensatora K59/K60	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wymiana kompensatora	
12	02.06.2018	Rejon kompensatora K51/K52	Pojawiły się dziury na rurze	Założono obejmę stalową na rurociągu	
13	13.06.2018	Rejon kompensatora K8/K9	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Pospawano łatę na rurociągu	
14	19.06.2018	Rejon kompensatora K8/K9	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Pospawano łatę na rurociągu	
15	20.06.2018	Rejon kompensatora K68/K69	Brak zastrzałów na podporze stałej	Założono obejmę na rurociągu	
16	25.06.2018	Rejon kompensatora K8/K9	Pojawiły się dziury na rurze	Pospawanie łaty stalowej na rurociągu	
17	02.07.2018	Rejon węzła „L”	Pojawiły się dziury na rurze	Wymieniono rurę stalową	
18	03.07.2018	Rejon za węzłem „Z”	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wymieniono kompensator stalowy K89	
19	12.07.2018	Rejon kompensatora K59/K60	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Założono obejmę stalową na rurociągu	
20	15.07.2018	Rejon kompensatora K40/właz	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Pospawano łatę stalową na rurociągu	

21	29.07.2018	Rejon kompensatora K36/K37	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Pospawano łatę stalową na rurociągu	Zmiana materiału rury stalowej na rurę stalową o lepszych parametrach ścieralnych. Zwiększenie klasy jakości połączeń spawanych. Użycie innego materiału rurociągu PEHD lub stali z wkładką trudnościeralną.
22	15.08.2018	Rejon kompensatora K8/K9	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wycięto i pospawano łatę stalową oraz założono obejmę na rurociągu	
23	26.08.2018	Rejon kompensatora K37/K38	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Założono obejmę na rurociągu	
24	12.09.2018	Połączenie spawane na kolanie stalowym przed zasuwą B29 węzeł „B”	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Pospawano łatę na rurociągu	
25	12.09.2018	Połączenie spawane na kolanie stalowym przed zasuwą B29 węzeł „B”	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Pospawano łatę na kolanie stalowym	
26	23.09.2018	Kolano stalowe rejon kompensatora K60	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Założono obejmę na kolanie	
27	10.05.2019	Rejon wpięcia R2, podejście rurociągu na zaporę boczną K63/K64	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Pospawano miejsce wycieku	
28	11.07.2019	Rejon kompensatora K63/K64	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Pospawano łatę stalową	
29	18.03.2020	Rejon kompensatora K12 (spód obejmy)	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Pospawano łatę stalową	
30	12.08.2020	Rejon przepustu na trasie kompensatora K40	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Pospawano łatę stalową	
31	19.08.2022	Rejon przepustu na trasie kompensatora K42	Pojawiły się dziury na wsuwce kompensatora	Wymieniono wsuwkę kompensatora K42	

3.3. Zestawienie awarii rurociągu odpadów poflotacyjnych R3

Tablica 3.3. Zestawienie awarii rurociągu odpadów poflotacyjnych R3, DN 1000 mm, trasa od komory rozrządu RG w kierunku węzła B (dane źródłowe: Archiwum KGHM Polska Miedź S.A.)

Lp.	Data awarii	Lokalizacja awarii	Rodzaj awarii	Wykonane czynności naprawcze	Propozycja zastosowania metody naprawczej
1	02.01.2018	Rejon kompensatora K59/K60	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu oraz założono obejmę na rurociągu	

2	04.01.2018	Rejon kompensatora K47/K48	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu oraz założono obejmę na rurociągu	Zmiana materiału rury stalowej na rurę stalową o lepszych parametrach ścieralnych. Zwiększenie klasy jakości połączeń spawanych. Użycie innego materiału rurociągu PEHD lub stali z wkładką trudnościeralną.
3	09.01.2018	Rejon kompensatora K18/K19	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu oraz założono obejmę na rurociągu	
4	24.01.2018	Rejon kompensatora K48/K49	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu oraz założono obejmę na rurociągu	
5	12.02.2018	Rejon kompensatora K40/K41	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wymiana kolano stalowego	
6	23.02.2018	Rejon kompensatora K71/K72	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu oraz założono obejmę na rurociągu	
7	10.03.2018	Rejon kompensatora K16/K17	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu oraz założono obejmę na rurociągu	
8	19.03.2018	Rejon kompensatora K15/K16	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu oraz założono obejmę na rurociągu	
9	20.03.2018	Rejon kompensatora K13/K14	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu oraz założono obejmę na rurociągu	
10	23.03.2018	Rejon kompensatora K13/K14	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu	
11	09.04.2018	Rejon kompensatora K13/K14	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu oraz założono obejmę na rurociągu	
12	09.04.2018	Rejon kompensatora K20/K21	Pojawiły się dziury na rurze	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu oraz założono obejmę na rurociągu	
13	10.04.2018	Rejon kompensatora K46/K47	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu oraz założono obejmę na rurociągu	

14	13.04.2018	Rejon kompensatora K59/K60	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu oraz założono obejmę na rurociągu	Zmiana materiału rury stalowej na rurę stalową o lepszych parametrach ścieralnych. Zwiększenie klasy jakości połączeń spawanych. Użycie innego materiału rurociągu PEHD lub stali z wkładką trudnościeralną.
15	01.06.2018	Rejon kompensatora K67/K68	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Założono obejmę na rurociągu	
16	11.06.2018	Rejon kompensatora K16/K17	Pojawiły się dziury na rurze	Założono obejmę na rurociągu	
17	14.06.2018	Rejon kompensatora K22/K23	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Pospawano łatę stalową w miejscu przecieku	
18	06.07.2018	Rejon kompensatora K16/K17	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Założono obejmę na rurociągu	
19	07.07.2018	Rejon kompensatora K47/K48	Pojawiły się dziury na rurze	Założono obejmę na rurociągu	
20	13.07.2018	Rejon kompensatora K65/K66	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Założono obejmę na rurociągu	
21	15.07.2018	Rejon kompensatora K18/K19	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Założono obejmę na rurociągu	
22	11.06.2018	Rejon kompensatora K16/K17	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Założono obejmę na rurociągu	
23	20.07.2018	Rejon kompensatora K15/K16	Pojawiły się dziury na rurze	Założono obejmę na rurociągu	
24	06.09.2018	Rejon kompensatora K46	Pojawiły się dziury na rurze	Założono obejmę na rurociągu	
25	19.09.2018	Rejon kompensatora K14/K16	Pojawiły się dziury na rurze	Założono obejmę na rurociągu	
26	08.10.2018	Rejon kompensatora K61	Pojawiły się dziury na rurze	Założono obejmę na rurociągu	
27	25.04.2019	Rejon kompensatora K60	Pojawiły się dziury na rurze	Pospawano łatę stalową na rurociągu	
28	08.10.2019	Rejon kompensatora K61	Pojawiły się dziury na rurze	Pospawano łatę stalową na rurociągu	

3.4. Zestawienie awarii rurociągów odpadów poflotacyjnych A2 i A1

Tablica 3.4. Zestawienie awarii rurociągów odpadów poflotacyjnych A2 i A1, DN 1000 mm, trasa od CPO Rudna w kierunku komory RG (dane źródłowe: Archiwum KGHM Polska Miedź S.A.)

Lp.	Data awarii	Lokalizacja awarii	Rodzaj awarii	Wykonane czynności naprawcze	Propozycja zastosowania metody naprawczej
1	19.02.2018	Pompownia H rurociąg A2	Pojawiło się rozszczelnienie połączenia kołnierzowego	Wymieniono uszczelkę, wykonano nowe połączenie kołnierzowe	Zmiany polegające na zastosowaniu tulei kołnierzowych długich na połączeniach stali z rurą PEHD. Zwiększenie klasy jakości połączeń spawanych/zgrzewanych.
2	15.12.2020	Rurociąg A1 od CPO Rudna w kierunku Komory RG Rejon kompensatora K47/K48	Pękła tuleja PEHD, połączenie kołnierzowe	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu oraz założono obejmę na rurociągu	

3.5. Zestawienie awarii Lubińskich rurociągów odpadów poflotacyjnych L0, L1, L2 i L3

Tablica 3.5. Zestawienie awarii Lubińskich rurociągów odpadów poflotacyjnych, tj. L0, L1, L2 i L3, DN 800 mm, trasa od ZWR Lubin do węzła „L" (dane źródłowe: Archiwum KGHM Polska Miedź S.A.)

Lp.	Data awarii	Lokalizacja awarii	Rodzaj awarii	Wykonane czynności naprawcze	Propozycja zastosowania metody naprawczej
1	04.03.2018	Rurociąg L0 od LG do węzła „L", rejon za wpięciem z rurociągu L5 DN 800 mm	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Zastosowano doraźnie opaski na rurociąg, w kolejnym etapie nastąpiła wymiana rurociągu na długości L=5 m	Zmiana materiału rury stalowej na rurę stalową o lepszych parametrach ścieralnych. Zwiększenie klasy jakości połączeń spawanych. Użycie innego materiału rurociągu PEHD lub stali z wkładką trudnościeralną.
2	29.04.2018	Rurociąg L0 - 5 m za wpięciem z rurociągu L5 DN 800 mm	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Założono obejmę na rurociągu	
3	06.06.2018	Rurociąg L3 - 5 m za wpięciem z rurociągu L5 DN 800 mm	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu oraz założono obejmę na rurociągu	

4	25.09.2018	Rurociąg lubiński L3, rejon od ZWR Polkowice w kierunku „L”, w rejonie kompensatora K4	Pojawiły się nieszczelności na uszczelce kompensatora	Wymiana uszczelki	Zmiana materiału rury stalowej na rurę stalową o lepszych parametrach ścieralnych. Zwiększenie klasy jakości połączeń spawanych. Użycie innego materiału rurociągu PEHD lub stali z wkładką trudnościeralną.
5	08.06.2019	Rurociąg lubiński L1, rejon od komory LG w kierunku węzła „L”, w rejonie kompensatora K6	Pojawiły się nieszczelności na uszczelce kompensatora	Wymiana uszczelki	
6	14.06.2019	Rurociąg lubiński L3, rejon od ZWR Polkowice w kierunku komory LG, w rejonie połączenia PE, rejon wysokich podpór	Pojawiły się dziury na połączeniu kołnierzowym	Wymiana uszczelki	
7	26.08.2020	Rurociąg L2 od ZWR Polkowice do komory LG, rejon kompensatora K8	Pojawiły się dziury na kompensatorze stalowym	Wymiana kompensatora stalowego, zaś rurociąg obrócono	
8	19.09.2020	Rurociąg lubiński L2, rejon kompensatora K47	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu oraz założono obejmę na rurociągu	
9	19.09.2020	Rurociąg lubiński DN 1000/DN800 mm, rejon wstawki stalowej pomiędzy zasuwą LK53, a kompensatorem , rejon komory LG	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wymiana wstawki stalowej, w czasie postoju technologicznego	
10	04.10.2020	Rurociąg zrzutowy L1, rejon węzła „L”	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Poprawiono połączenie spawane	
11	25.11.2020	Rurociąg L3 od ZWR Polkowice do komory LG, rejon od strony ZWR Polkowice – wysokie podpory	Pojawił się wypływ na połączeniu kołnierzowym PEHD	Wymieniono uszczelkę w połączeniu kołnierzowym	Zmiana materiału rury stalowej na rurę stalową o lepszych parametrach ścieralnych. Zwiększenie klasy jakości połączeń spawanych. Użycie innego materiału rurociągu PEHD lub stali z wkładką trudnościeralną.
12	25.01.2021	Rurociąg L2 od ZWR Polkowice do komory LG, rejon kompensatora K38	Pojawił się wyciek na kompensatorze	Wymieniono kompensator stalowy	
13	04.08.2021	Rurociąg L2 od ZWR Polkowice do komory LG, rejon kompensatora K17	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wymieniono w miejscu awarii rurociąg stalowy DN 800 mm na długości około L=1,0 m	
14	17.01.2022	Rurociąg L2 od ZWR Polkowice do komory LG, rejon kompensatora K38	Pojawił się wyciek na kompensatorze	Wymieniono w miejscu awarii rurociąg stalowy DN 800 mm	
15	20.06.2023	Rurociąg L1 od LG do węzła „L”, rejon kompensatora K19	Pojawił się wyciek na kompensatorze	Wymieniono uszczelkę w kompensatorze	

3.6. Zestawienie awarii rurociągów odpadów poflotacyjnych i instalacji technologicznej w Pompowni ZWR Rudna

Tablica 3.6. Zestawienie awarii rurociągów odpadów poflotacyjnych i instalacji technologicznej w Pompowni ZWR Rudna, Strona A i Strona B (dane źródłowe: Archiwum KGHM Polska Miedź S.A.)

Lp.	Data awarii	Lokalizacja awarii	Rodzaj awarii	Wykonane czynności naprawcze	Propozycja zastosowania metody naprawczej
1	05.01.2018	Rurociąg ssący na zestawie pompowym D3/D4 (Strona A)	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu	Zmiana materiału rury stalowej na rurę stalową o lepszych parametrach ścieralnych. Zwiększenie klasy jakości połączeń spawanych. Użycie innego materiału rurociągu PEHD lub stali z wkładką trudnościeralną.
2	02.02.2018	Rurociąg ssący na zestawie pompowym B2 (Strona B)	Pojawiły się dziury na rurze stalowej przy zasuwie odcinającej	Pospawano dziurę	
3	09.04.2018	Rurociąg ssący na zestawie pompowym D3/D4 (Strona A)	Pojawiły się dziury na króćcu na kolanie za D-4	Pospawano dziurę	
4	22.04.2018	Rurociąg ssący na zestawie pompowym D3/D4 (Strona A)	Pojawiły się dziury na zasuwie pomiarowej	Pospawano dziurę	
5	23.04.2018	Rurociąg ssący na zestawie pompowym D3/D4 (Strona A)	Pojawiły się dziury na króćcu przy zasuwie	Pospawana łata stalowa	
6	24.04.2018	Rurociąg ssący na zestawie pompowym D33/D34	Pojawiły się dziury na króćcu przy zasuwie	Pospawana łata stalowa	
7	28.04.2018	Rurociąg ssący na zestawie pompowym D33/D34	Pojawiły się dziury na króćcu przy zasuwie	Pospawana łata stalowa	
8	29.04.2018	Zbiornik Pomiarowy	Rozerwane węże gumowe	Wymieniono węże gumowe	

9	05.05.2018	Rurociąg ssący na zestawie pompowym D7/D8	Pojawiły się dziury na króćcu przy zasuwie	Pospawano dziurę	Zmiana materiału rury stalowej na rurę stalową o lepszych parametrach ścieralnych. Zwiększenie klasy jakości połączeń spawanych. Użycie innego materiału rurociągu PEHD lub stali z wkładką trudnościeralną.
10	14.05.2018	Rurociąg ssący na zestawie pompowym D3/D4 (Str. A)	Pojawiły się dziury na zasuwie pomiarowej	Pospawana łata stalowa	
11	16.05.2018	Rurociąg ssący na zestawie pompowym D33/D34	Pojawił się wypływ na instalacji pomiarowej	Pospawana łata stalowa kołnierzowym	
12	22.05.2018	Rurociąg ssący na zestawie pompowym D23/D24	Pojawiły się dziury na króćcu przy zasuwie	Pospawano dziurę	
13	25.05.2018	Rurociąg ssący na zestawie pompowym D33/D34	Pojawiły się dziury na króćcu przy zasuwie, rozszczelnił się przewód zasilający instalację CBJ za D34	Pospawano dziurę	
14	25.05.2018	Rurociąg ssący na zestawie pompowym D3/D4 (Strona A)	Pojawił się wyciek na kompensatorze	Wymieniono w miejscu awarii rurociąg stalowy DN 800 mm	
15	27.05.2018	Zestaw pompowy, strona A	Brak danych	Brak danych	
16	17.06.2018	Rurociąg ssący na zestawie pompowym D3/D4 (Strona A)	Pojawiły się dziury na króćcu	Pospawano dziury	
17	18.06.2018	Rurociąg ssący na zestawie pompowym D3/D4 (Strona A)	Pojawiły się dziury na króćcu	Pospawano dziury	
18	19.06.2018	Rurociąg ssący na zestawie pompowym D35/D36 (Strona A)	Pojawiły się dziury na króćcu	Pospawano dziury	
19	21.06.2018	Rurociąg ssący na zestawie pompowym D7/D8 (Strona A)	Pojawiły się dziury na króćcu	Pospawano dziury	

20	25.06.2018	Rurociąg ssący na zestawie pompowym D35/D36	Pojawiły się dziury na króćcu	Pospawano dziury	
21	26.06.2018	Rurociąg na zestawie pompowym D35/D36	Pojawiły się dziury na króćcu	Pospawano dziury	
22	05.07.2018	Rurociąg na zestawie pompowym D35/D36	Pojawiły się dziury na zasuwie za zestawem pompowym D36	Pospawano dziury	
23	05.07.2018	Rurociąg na zestawie pompowym D33/D34	Pojawił się wyciek z węża za zestawem pompowym D34	Wymieniono wąż za zestawem pompowym D34	
24	19.02.2019	Rurociąg na zestawie rurociągu A-2 wpięcie nr 7	Pojawił się wyciek na połączeniu kołnierzowym	Wymieniono uszczelkę w połączeniu kołnierzowym	
25	02.04.2019	Kolano tłoczne za pompą na zestawie D48	Pojawiły się dziury na kolanie stalowym	Wykonano i wymieniono kolano stalowe	
26	05.04.2019	Armatura: klapy zwrotnej rejon za zestawem pompowym D36	Pojawiły się nieszczelności w armaturze (strona A)	Wymieniono klapę zwrotną	Zmiana materiału wykonanej armatury, odpornych na ścieranie, np. ze stali nierdzewnej odpornej na korozję, austenityczna stal nierdzewny
27	26.09.2020	Rurociąg B2 (Strona B)	Pojawiły się dziury na rurociągu B2	Pospawano dziury	
28	15.12.2020	Połączenie kołnierzowe stal/PEHD ZA Hala Flotacji	Pojawił się wypływ na instalacji technologicznej, pęknięta tuleja PEHD	Wymieniono tuleję PEHD	Zmiany polegające na zastosowaniu tulei kołnierzowych długich na połączeniach stali z rurą PEHD. Zwiększenie klasy jakości połączeń spawanych/zgrzewanych.

3.7. Zestawienie awarii rurociągów odpadów poflotacyjnych i instalacji technologicznej w Pompowni ZWR Polkowice

Tablica 3.7. Zestawienie awarii rurociągów odpadów poflotacyjnych i instalacji technologicznej w Pompowni ZWR Polkowice (dane źródłowe: Archiwum KGHM Polska Miedź S.A.)

Lp.	Data awarii	Lokalizacja awarii	Rodzaj awarii	Wykonane czynności naprawcze	Propozycja zastosowania metody naprawczej
1	12.03.2018	Rurociąg na zestawie pompowym RP3 rejon na hali pompowej	Pojawiło się rozszczelnienie zasuwy na rurze stalowej	Zdemontowano zasuwę, zamontowano zaślepkę stalową	Zmiany polegające na zastosowanie tulei kołnierzowych długich na połączeniach stali z rurą PEHD. Zwiększenie klasy jakości połączeń spawanych/zgrzewanych Zmiana materiału rury stalowej na rurę stalową o lepszych parametrach ścieralnych. Zwiększenie klasy jakości połączeń spawanych. Użycie innego materiału rurociągu PEHD lub stali z wkładką trudnościeralną.
2	29.03.2018	Rurociąg na próbniku	Pojawiły się dziury na rurze	Założono obejmę	
3	13.07.2018	Rurociąg na zestawie pompowym RP3	Pojawiły się nieszczelności na połączeniu kołnierzowym	Wymiana połączenia kołnierzowego	
4	20.08.2018	Rurociąg PEHD na układzie L-1	Pojawiły się nieszczelności na rurociągu do próbnika L-1	Wymiana połączenia kołnierzowego	
5	20.05.2019	Armatura kompensatora ZP3 na rurociągu RP-3	Pojawiły się nieszczelności na kompensatorze	Wymiana kompensatora	
6	23.05.2019	Rurociąg na zestawie pompowym P 3.2	Pojawiły się nieszczelności na połączeniu kołnierzowym	Wymiana połączenia kołnierzowego	

3.8. Zestawienie awarii rurociągów odpadów poflotacyjnych i instalacji technologicznej w Pompowni ZWR Lubin

Tablica 3.8. Zestawienie awarii rurociągów odpadów poflotacyjnych i instalacji technologicznej w Pompowni ZWR Lubin (dane źródłowe: Archiwum KGHM Polska Miedź S.A.)

Lp.	Data awarii	Lokalizacja awarii	Rodzaj awarii	Wykonane czynności naprawcze	Propozycja zastosowania metody naprawczej
1	06.01.2018	Zestaw pompowy L3	Pojawiły się dziury na rurociągu ssącym	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu oraz założono obejmę na rurociągu	Zmiana materiału rury stalowej na rurę stalową o lepszych parametrach ścieralnych. Zwiększenie klasy jakości połączeń spawanych/ montażu.
2	23.01.2018	Zestaw pompowy L1	Pojawiły się dziury na rurociągu ssącym	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu	
3	13.02.2018	Zestaw pompowy L1	Pojawiły się dziury na rurociągu ssącym	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu	
4	26.02.2018	Zestaw pompowy L1 i L3	Pojawiły się dziury na zasuwie pomiarowej	Założono obejmę	

5	27.02.2018	Zestaw pompowy L1 i L3	Pojawiły się dziury na rurociągu na próbniku	Pospawana łata stalowa	Użycie innego materiału rurociągu PEHD lub stali z wkładką trudnościeralną.
6	11.03.2018	Zestaw pompowy L1 i L3	Pojawiły się dziury na rurociągu na próbniku	Pospawana łata stalowa	
7	26.03.2018	Zestaw pompowy L1 i L3	Pojawiły się dziury na rurociągu na próbniku	Pospawana łata stalowa	
8	05.04.2018	Zestaw pompowy L1 i L2	Pojawiły się dziury na rurociągu na próbniku	Wymieniono węże gumowe	
9	07.04.2018	Zestaw pompowy L1 i L2	Pojawiły się dziury na rurociągu na próbniku	Pospawano dziurę	
10	23.04.2018	Zestaw pompowy L1 i L3	Pojawiły się dziury na rurociągu na próbniku	Pospawana łata stalowa	
11	24.04.2018	Zestaw pompowy L1 i L3	Pojawiły się dziury na rurociągu na próbniku	Pospawana łata stalowa kołnierzowym	Zmiana materiału rury stalowej na rurę stalową o lepszych parametrach ścieralnych. Zwiększenie klasy jakości połączeń spawanych. Użycie innego materiału rurociągu PEHD lub stali z wkładką trudnościeralną.
12	06.05.2018	Zestaw pompowy L2	Przeciekająca zasuwa	Pospawano dziurę	
13	12.05.2018	Zbiornik próbo pobieraka CBJ	Przeciekająca zasuwa	Pospawano dziurę	
14	23.05.2018	Zbiornik próbo pobieraka	Przeciekająca zasuwa	Wymieniono w miejscu awarii rurociąg stalowy DN 800 mm	
15	25.05.2018	Zbiornik próbo pobieraka	Przeciekająca zasuwa	Brak danych	
16	30.05.2018	Zestaw pompowy L1	Pojawiły się dziury na rurociągu na próbniku	Pospawano dziury	
17	01.06.2018	Zestaw pompowy L1	Rozszczelnienie instalacji za zasuwą	Pospawano dziury	
18	05.06.2018	Zestaw pompowy L2	Pojawiły się dziury na instalacji za zasuwą	Pospawano dziury	
19	07.06.2018	Zestaw pompowy L2	Pojawiły się dziury na instalacji za zasuwą	Pospawano dziury	
20	07.06.2018	Zestaw pompowy L1	Pojawiły się dziury na rurociągu na próbo pobieraku	Pospawano dziury	
21	08.06.2018	Zestaw pompowy L1	Pojawiły się dziury na rurociągu na próbo pobieraku	Pospawano dziury	
22	10.06.2018	Zestaw pompowy L3	Pojawiły się dziury na instalacji próbo pobieraku	Pospawano dziury	
23	11.06.2018	Zestaw pompowy L1	Pojawiły się dziury na instalacji próbo pobieraka	Wymieniono wąż za zestawem pompowym D34	
24	14.06.2018	Zestaw pompowy L2	Pojawiły się dziury na króćcu	Wymieniono uszczelkę w	

			zasilającym próbo pobierak	połączeniu kołnierzowym	
25	23.07.2018	Zestaw pompowy L1	Pojawiły się dziury na instalacji próbo - pobieraka	Wykonano i wymieniono kolano stalowe	
26	03.08.2018	Zestaw pompowy L3	Pojawiły się dziury na instalacji próbo - pobieraka	Wymieniono klapę zwrotną	
27	05.08.2018	Zestaw pompowy L1	Pojawiły się dziury na instalacji próbo - pobieraka	Pospawano dziury	
28	09.08.2018	Zestaw pompowy L3	Pojawiły się dziury na instalacji próbo - pobieraka	Wymieniono tuleję PEHD	
29	28.08.2018	Zestaw pompowy L1	Rozszczelniony rurociąg z PEHD do próbo pobieraka L1	Brak danych	
30	30.08.2018	Zestaw pompowy L2	Przeciekająca zasuwa	Wymieniono zasuwę	
31	03.09.2018	Zestaw pompowy L3	Pojawiły się dziury na instalacji próbopobieraków	Pospawano dziury	
32	07.09.2018	Zestaw pompowy L1	Pojawiły się dziury na instalacji próbo-pobieraków	Pospawano dziury	
33	13.09.2018	Zestaw pompowy L1	Pojawiły się dziury na instalacji próbo pobieraków	Pospawano dziury	
34	17.09.2018	Zestaw pompowy L3	Pojawiły się dziury na instalacji próbo pobieraków	Pospawano dziury	
35	18.09.2018	Zestaw pompowy L1	Pojawiły się dziury na instalacji próbo pobieraków	Pospawano dziury	
36	18.09.2018	Zestaw pompowy L2	Pojawiły się dziury na instalacji próbo pobieraków	Pospawano dziury	
37	21.04.2019	Korpus pompy 501A	Pękniecie korpusu pompy, będącej na postoju technologicznym	Wymiana pompy na nową	Zmiana materiału wykonanej armatury, odpornego na ścieranie, np. ze stali nierdzewnej odpornej na korozję, na stal austenityczną nierdzewną
39	30.04.2019	Pompa 500 C	Przeciekająca pompa 500 C	Wymiana pasów	
40	12.05.2019	Nowa pompa 501A, na tulei ochronnej wału	Pojawiły się nieszczelności na nowej pompie 501A – tulei ochronnej wału	Wymiana sznurów doszczelniających	
41	19.08.2020	Pompa 503A	Pękniecie korpusu pompy 503A	Wymiana na inny korpus w pompie	
42	26.08.2020	Zasuwa Z11	Nieszczelna armatura	Wymiana kostek w armaturze	
43	19.05.2024	Pompa 502C	Urwany wirnik – pompy 502C	Wymiana wirnika uszkodzonego	

3.9. Zestawienie awarii rurociągów odpadów poflotacyjnych w rejonach węzłów zlokalizowanych wokół OUOW Żelazny Most

Tablica 3.9. Zestawienie awarii rurociągów odpadów poflotacyjnych o średnicy DN 1000 mm w rejonach węzłów zlokalizowanych wokół OUOW Żelazny Most (Archiwum KGHM Polska Miedź S.A.)

Lp.	Data awarii	Lokalizacja awarii	Rodzaj awarii	Wykonane czynności naprawcze	Propozycja zastosowania metody naprawczej
1	02.02.2022	Rejon węzła zasuw, na przepince rurociągu R2 SN 1000 mm na P3	Przeciekający rurociąg stalowy	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu	Zmiana materiału rury stalowej na rurę stalową o lepszych parametrach ścieralnych. Zwiększenie klasy jakości połączeń spawanych. Użycie innego materiału rurociągu np. PEHD lub stali z wkładką trudnościeralną.
2	08.06.2022	Rejon węzła zasuw, węzła Z, przy zasuwie Z-32	Przeciekający rurociąg stalowy	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu	
3	09.07.2022	Rejon węzła zasuw PO, przy zasuwie N43	Przeciekający rurociąg stalowy	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu	
4	09.07.2022	Rurociąg wapienny, rejon pompowni L, w przepuście	Przeciekający rurociąg stalowy	Wymiana rurociągu w przepuście na długości około L=8 m	
5	16.07.2022	Rurociąg zimowy, przy odwodnieniu Z14, węźle L oraz w miejscu wpięcia się rurociągu L3 w H5	Przeciekający rurociąg stalowy	Wycięto i pospawano łaty stalowe na rurociągu	
6	26.10.2022	Rejon węzła Z, w miejscu wpięcia się rurociągu r1 w P3	Przeciekający rurociąg stalowy	Wycięto i pospawano łaty stalowe na rurociągu	
7	29.10.2022	Rurociąg wapienny, rejon pomiędzy węzłem L, a pompownią L	Przeciekający rurociąg stalowy	Wymiana rurociągu w przepuście na dług. ok. L=16 m	
8	01.01.2023	Rejon węzła zasuw, węzła L, przy zasuwie L-27	Przeciekający korpus zasuwy DN 800 mm	Wymiana zasuwy odcinającej DN 800 mm	
9	13.01.2023	Rejon węzła zasuw, węzła L, pomiędzy zasuwą Z5 , a Z6 oraz miejsce wpięcia się rurociągu RW w H3	Przeciekający rurociąg stalowy	Wycięto i pospawano łaty stalowe na rurociągu	
10	18.06.2023	Rejon węzła zasuw, węzła Z, wpięcia się rurociągu R2w P3 oraz przy kompensatorze K84	Przeciekający rurociąg stalowy	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu	Zmiana materiału rury stalowej na rurę stalową o lepszych parametrach ścieralnych. Zwiększenie klasy jakości połączeń

11	25.06.2023	Rejon węzła zasuw, węzła L, wpięcie się rurociągu L2 w H3	Przeciekający rurociąg stalowy	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu	spawanych. Użycie innego materiału rurociągu PEHD lub stali z wkładką trudnościeralną.
12	27.07.2023	Rejon węzła zasuw, węzła L, za zasuwą Z14 na rurociągu H5	Przeciekający rurociąg stalowy	Wymiana rury stalowej na długości około L=4,0 m	

3.10. Zestawienie awarii rurociągu technologicznego wody przemysłowej RW1

Tablica 3.10. Zestawienie awarii rurociągu technologicznego wody przemysłowej RW1 o średnicy DN 1000 mm (dane źródłowe: Archiwum KGHM Polska Miedź S.A.)

Lp.	Data awarii	Lokalizacja awarii	Rodzaj awarii	Wykonane czynności naprawcze	Propozycja zastosowania metody naprawczej
1	01.05.2018	Rejon kompensatora K3/K4 (rejon komory K5 i K6)	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu oraz założono obejmę na rurociągu	Zmiana materiału rury stalowej na rurę stalową o lepszych parametrach ścieralnych. Zwiększenie klasy jakości połączeń spawanych. Użycie innego materiału rurociągu np. PEHD lub stali z wkładką trudnościeralną.
2	27.08.2018	Rejon kompensatora K3/K4 (rejon komory K5 i K6)	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu oraz założono obejmę na rurociągu	
3	16.03.2019	Rejon kompensatora przy odpowietrzniku nr 10 (przed komorą K-5)	Przeciekający kompensator stalowy o średnicy DN 1000 mm	Wymiana uszczelki w kompensatorze, i ponowne skręcenie kompensatora stalowego DN 1000 mm	
4	22.05.2019	Rejon pompowni „R”	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu	
5	03.09.2019	Rejon pomiędzy pompownią Kalinówka a pompownią Tarnówek, na dług. L=500 m , rejon za odpowietrznikiem nr 2 w kierunku miejscowości Tarnówek	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Założono obejmę na rurociągu. Pospawano łaty stalowe w przeciekającym miejscu.	
6	22.02.2020	Rejon na długości około L=50 m - za komorą Rozrządu "R "	Pęknięta tuleja kołnierzowa, rozszczelnienie poprzeczne rurociągu	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu oraz założono obejmę na rurociągu	

7	15.08.2020	Rejon odpowietrznika Nr 10	Nieszczelny kompensator stalowy o średnicy DN 1000 mm	Wymiana kompensatora stalowego o średnicy DN 1000 mm	
8	21.10.2020	Rejon za przepompownią odpadów poflotacyjnych "R" w kierunku miejscowości Tarnówek	Pęknięty rurociąg stalowy	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu	
9	31.10.2020	Rejon komory K-9, przy drodze 331	Pęknięty rurociąg stalowy	Wymienia rurociągu na długości L=3,5m	Zmiana materiału rury stalowej na rurę stalową o lepszych parametrach ścieralnych. Zwiększenie klasy jakości połączeń spawanych. Użycie innego materiału rurociągu PEHD lub stali z wkładką trudnościeralną.
10	27.11.2020	Rejon za komorą K-6, w odległości około L=300 m	Pęknięty rurociąg stalowy	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu oraz założono obejmę na rurociągu	
11	01.12.2021	Rejon przed komorą K-6 w stronę komory K-5	Pęknięty rurociąg stalowy	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu oraz założono obejmę na rurociągu	
12	05.12.2021	Rejon pod przepustem przy obiekcie HO	Pęknięte połączenie kołnierzowe PE/STAL	Wymieniono ww. połączenie na kompensator stalowy	
13	06.12.2021	Rejon kształtki: czwórnika w komorze K-6 pomiędzy Z-1, Z-3, Z-2	Przeciekająca kształtka stalowa	Poprawiono połączenia spawane	
14	22.02.2022	Rejon komory K-4	Przeciekająca kształtka stalowa	Poprawiono połączenia spawane	
15	25.03.2022	Rejon komory K-5	Przeciekająca armatura	Pospawano łaty stalowe na armaturze	
16	30.05.2022	Rejon komory K-5	Przeciekający rurociąg	Wymieniona przepustnica	
17	15.07.2022	Rejon kompensatora K-6	Przeciekające połączenie rurociągu stalowego	Wymiana połączenia uszkodzonego	
18	12.12.2022	Rejon kształtki: trójnika przy komorze K4	Przeciekający trójnik	Założono obejmę na rurociągu, pospawano łaty stalowe	
19	25.11.2023	Rejon komory K6	Przeciekający rurociąg, skorodowane spawy rury stalowej na szwie	Wymiana uszkodzonej rury stalowej	Zmiana materiału rury stalowej na rurę stalową o lepszych parametrach ścieralnych. Zwiększenie klasy

20	27.11.2023	Rejon komory K6	Przeciekający rurociąg, skorodowane spawy rury stalowej na szwie	Wymiana uszkodzonej rury stalowej	jakości połączeń spawanych. Użycie innego materiału rurociągu PEHD lub stali z wkładką trudnościeralną.
21	06.12.2023	Rejon kompensatora K-5	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wymiana kompensatora stalowego	

3.11. Zestawienie awarii rurociągu technologicznego wody przemysłowej RW2

Tablica 3.11. Zestawienie awarii rurociągu technologicznego wody przemysłowej RW2 o średnicy DN 1000 mm (dane źródłowe: Archiwum KGHM Polska Miedź S.A.)

Lp.	Data awarii	Lokalizacja awarii	Rodzaj awarii	Wykonane czynności naprawcze	Propozycja zastosowania metody naprawczej
1	21.09.2018	Rejon pompowni „R”	Pęknięty rurociąg stalowy	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu	Zmiana materiału rury stalowej na rurę stalową o lepszych parametrach ścieralnych. Zwiększenie klasy jakości połączeń spawanych. Użycie innego materiału rurociągu np. PEHD lub stali z wkładką trudnościeralną.
2	12.11.2018	Rejon kształtki: kolana stalowego przy Komorze RG	Pęknięte kolano stalowe	Wymiana kolana stalowego	
3	24.02.2020	Rejon odpowietrznika nr 10 pomiędzy komorą K4 , a K5 , na trasie ok. 500 m przed komorą „RG”	Przeciekający kompensator stalowy o średnicy DN 1000 mm	Wymiana uszczelki w kompensatorze, ponowne skręcenie kompensatora stalowego DN 1000 mm	
4	25.06.2020	Rejon kształtki: kolana stalowego przy Komorze K6	Pęknięte kolano stalowe	Wymiana kształtki kolano i kompensatorów w ilości 3 szt., pęknięte spawy	
5	03.07.2020	Rejon kształtki: kolana stalowego przy Komorze K6	Pęknięte kolano stalowe	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu	
6	08.07.2020	Rejon na Komory K6	Pęknięty rurociąg stalowy	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu	
7	21.10.2020	Rejon komory „R” kształtki: kolana	Nieszczelny rurociąg	Poprawione połączenie spawane na kolanie	
8	06.11.2020	Rejon kształtki: kolana stalowego przy Komorze K6	Pęknięty rurociąg stalowy	Wycięto i wymieniono kolano stalowe	
9	01.12.2020	Rejon komory K-9, przy drodze 331	Pęknięty rurociąg stalowy	Poprawione połączenie spawane	

10	27.11.2020	Rejon za komorą K-6, w odległości około L=300 m	Pęknięty rurociąg stalowy	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu oraz założono obejmę na rurociągu	
11	18.01.2021	Rejon za skrzyżowaniem na Grodowiec , w odległości około L=500 m w kierunku pompowni Kalinówka	Pęknięty rurociąg stalowy	Montaż kompensatora stalowego w miejscu awarii, rozerwany spaw czołowy , przesunięcie się rur na odległość 5 cm	
12	16.08.2021	Rejon komory K-5 i K-6	Pęknięte kolano stalowe	Wymiana nowego kolana stalowego	Zmiana materiału rury stalowej na rurę stalową o lepszych parametrach ścieralnych. Zwiększenie klasy jakości połączeń spawanych. Użycie innego materiału rurociągu PEHD lub stali z wkładką trudnościeralną.
13	03.12.2021	Rejon za komorą K5 na długości L=100 m w kierunku komory K6	Pęknięty rurociąg stalowy	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu	
14	06.12.2021	Rejon przepompowni „R”	Pęknięty rurociąg stalowy	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu	
15	02.01.2022	Rejon komory K-5	Przeciekający rurociąg	Wymiana rurę stalową na nową	
16	13.03.2022	Rejon za komorą K-5 w kierunku komory K-4	Przeciekający kompensator stalowy	Wymieniono kompensator stalowy	
17	09.04.2022	Rejon kształtki: przy komorze K6	Przeciekająca kształtka	Wymiana kolana stalowego	
18	13.08.2022	Rejon stali LOTOS (droga Zielona Góra)	Przeciekający rurociąg	Wymiana uszkodzonej rury stalowej (wstawki o dług. L=1,0 m)	
19	06.09.2022	Rejon komory K6	Przeciekający rurociąg, skorodowane spawy rury stalowej na szwie	Wymiana uszkodzonej rury stalowej	
20	07.12.2022	Rejon kompensatora K-5	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wymiana kompensatora stalowego	
21	08.06.2023	Rejon za drogą S3 w stronę ZWR Polkowice	Pojawiły się dziury na kolanie stalowym	Wymiana na nowe kolano stalowe	
22	21.11.2023	Rejon komory K6	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wymiana kilku metrów rury stalowej	

3.12. Zestawienie awarii rurociągu technologicznego wody przemysłowej RW4

Tablica 3.12. Zestawienie awarii rurociągu technologicznego wody przemysłowej RW4 (RN5, Polkowicki R-4) o średnicy DN 1000/DN 1400 mm (dane źródłowe: Archiwum KGHM Polska Miedź S.A.)

Lp.	Data awarii	Lokalizacja awarii	Rodzaj awarii	Wykonane czynności naprawcze	Propozycja zastosowania metody naprawczej
1	14.01.2018	Rejon przy zasuwie Z-4/5	Pojawiły się dziury na rurociągu stalowym	Pospawanie łaty stalowej na rurociągu oraz wymiana odpowietrznika	Zmiana materiału rury stalowej na rurę stalową o lepszych parametrach ścieralnych. Zwiększenie klasy jakości połączeń spawanych. Użycie innego materiału rurociągu np. PEHD lub stali z wkładką trudnościeralną.
2	14.01.2018	Rejon komory KZ-1	Przeciekający odpowiednik	Wymiana odpowietrznika wraz z króćcem na rurociągu	
3	25.01.2018	Rejon kompensatora K45/K46	Przeciekające kompensatory stalowe	Dokręcenie kompensatorów stalowych	
4	31.01.2018	Rejon przed pompownią H przy kolanie stalowym	Pojawiły się dziury na kolanie	Założono obejmę	
5	11.03.2018	Rejon przed pompownią H	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Wycięto i pospawano łaty stalowe w 4 miejscach na rurociągu	
6	13.03.2018	Rejon kolana stalowego przy zasuwie Z-4/5	Pojawiły się dziury na kolanie	Pospawanie łat na kolanie	
7	14.03.2018	Rejon kompensatora K61	Przeciekający kompensator stalowy	Pospawanie łat na kompensatorze	
8	28.07.2018	Rejon kolana stalowego przy zasuwie Z-4/5	Przeciekające kolano stalowe	Pospawano łatę stalową	
9	10.09.2018	Rejon przed pompownią H	Pojawiły się dziury na rurociągu	Założono obejmę	
10	02.01.2019	Rejon przed kompensatorem K44	Pojawiły się dziury na rurociągu	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu	
11	22.01.2019	Rejon przy stacji LOTOS droga na Polkowcie	Pojawiły się dziury na rurociągu	Wycięto i pospawano łatę stalową na rurociągu	
12	22.06.2019	Rejon pompowni Tarnówek	Pęknięty rurociąg	Montaż wstawki stalowej w miejscu awarii	
13	02.08.2019	Rejon pompowni H	Pojawiły się dziury na rurociągu		

14	05.12.2019	Rejon pompowni Tarrnówek, pomiędzy T-12 a K2	Pęknięty rurociąg na spawie poprzecznym	Montaż wstawki stalowej w miejscu awarii	Zmiana materiału rury stalowej na rurę stalową o lepszych parametrach ścieralnych. Zwiększenie klasy jakości połączeń spawanych. Użycie innego materiału rurociągu PEHD lub stali z wkładką trudnościeralną.
15	09.02.2020	Rejon węzła H	Pęknięty rurociąg na spawie podłużnym	Wymiana rurociągu na dług. L=200 m	
16	08.06.2021	Rejon pompowni Tarrnówek, przy komorze T-12	Pojawiły się dziury na rurze stalowej	Pospawano łatę stalową w miejscu awarii	
17	02.01.2022	Rejon komory KZ-1	Przeciekająca armatura	Wymiana odpowietrznika przy przepustnicy P-8	
18	23.11.2022	Rejon komory E4	Pęknięty rurociąg na spawie połączenia rur	Pospawanie łaty stalowej na rurociągu	
19	13.01.2023	Rejon przy zasuwie Z-4/5	Pęknięty rurociąg na spawie hutniczym	Wymiana rury stalowej na dług. ok. L=12 m	
20	01.03.2023	Rejon pompowni Tarrnówek, przy komorze T-12 a K2	Pęknięty rurociąg na spawie hutniczym	Wymiana rury stalowej na dług. ok. L= 9 m	
21	06.11.2023	Rejon przed komorą K-5	Pęknięty rurociąg na spawie hutniczym	Wymiana rury stalowej na dług. ok. L= 2 m	

3.13. Zestawienie awarii Lubińskiego rurociągu technologicznego wody przemysłowej na trasie od OUOW Żelazny Most do ZWR Lubin

Tablica 3.13. Zestawienie awarii Lubińskiego rurociągu technologicznego wody przemysłowej o średnicy DN 1000/DN 800 mm na trasie od OUOW ŻELAZNY Most do ZWR Lubin (dane źródłowe: Archiwum KGHM Polska Miedź S.A.)

Lp.	Data awarii	Lokalizacja awarii	Rodzaj awarii	Wykonane czynności naprawcze	Propozycja zastosowania metody naprawczej
1	01.04.2018	Rejon rurociągu lubińskiego	Pojawiły się dziury na rurociągu stalowym	Pospawanie łaty stalowej na rurociągu - 5 szt.	Zmiana materiału rury stalowej na rurę stalową o lepszych parametrach ścieralnych. Zwiększenie klasy jakości połączeń spawanych. Użycie innego materiału rurociągu np. PEHD lub stali z wkładką trudnościeralną.
2	02.04.2018	Rejon rurociągu lubińskiego pod drogą DK3 (przy ZWR Lubin)	Pojawiły się dziury na rurociągu stalowym	Wymiana rurociągu stalowego pod drogą DK3 na dług. ok. L-40 m	
3	03.05.2018	Rejon kompensatora K23	Przeciekający kompensator stalowy	Wymiana kompensatora stalowego	
4	29.05.2018	Rejon ZWR Lubin	Pojawiły się dziury na rurociągu stalowym	Założono obejmę	

5	03.06.2018	Rejon rurociągu lubińskiego	Pojawiły się dziury na rurociągu stalowym	Pospawanie łaty stalowej na rurociągu - 5 szt.	Zmiana materiału rury stalowej na rurę stalową o lepszych parametrach ścieralnych. Zwiększenie klasy jakości połączeń spawanych. Użycie innego materiału rurociągu PEHD lub stali z wkładką trudnościeralną.
6	28.08.2018	Rejon ZWR Lubin	Pojawiły się dziury na rurociągu stalowym	Założono 2 sztuki obejmy	
7	11.08.2019	Rejon drogi do betoniarni Rynarcice	Pęknięty rurociąg na spawie podłużnym	Wymiana rury stalowej na dług. ok. L= 8 m	
8	24.06.2020	Rejon kolana stalowego na ZWR Lubin	Przeciekające kolano stalowe	Założono obejmę	
9	12.07.2020	Rejon rurociągu przy przepustnicy Z-62	Pojawiły się dziury na rurociągu stalowym	Wymiana przepustnicy z DN 800 mm na DN 1000 mm wraz z likwidacją zwężek stalowych DN 800 mm	
10	21.09.2020	Rejon za nowym wymienionym kolanem stalowym na ZWR Lubin	Pojawiły się dziury na rurociągu stalowym	Założono obejmę	
11	05.12.2021	Rejon drogi do betoniarni Rynarcice	Pęknięty rurociąg na spawie hutniczym	Wymiana rury stalowej na dług. ok. L= 8 m	
12	31.12.2021	Rejon drogi do betoniarni Rynarcice	Pęknięty rurociąg na spawie hutniczym	Wymiana rury stalowej na dług. ok. L= 17 m	
13	31.12.2021	Rejon przy pompowni Kalinówka	Pojawiły się dziury na rurociągu stalowym	Pospawanie łaty stalowej	
15	17.04.2022	Rejon starej drogi S-3	Pojawiły się dziury na rurociągu stalowym	Wymiana rury stalowej na dług. ok. L= 22 m	
16	18.04.2022	Rejon starej drogi S-3	Pęknięty rurociąg na spawie hutniczym	Wymiana rury stalowej na dług. ok. L= 24 m	
17	21.04.2022	Rejon przepompowni L , za przepustnicą Z-63	Pęknięty rurociąg na spawie hutniczym	Wymiana rury stalowej na dług. ok. L= 6 m	
18	14.08.2022	Rejon ZWR Lubin	Pojawiły się dziury na wymienionym kolanie stalowym	Wymiana kolana stalowego na nowe i wymiana rury stalowej na dług. ok. L=3 m	
19	09.04.2023	Rejon rurociągu lubińskiego, za ZWR Lubin w kierunku OUOW Żelazny Most	Pęknięty rurociąg na spawie hutniczym	Wymiana rury stalowej na dług. ok. L= 9 m	

20	01.11.2023	Rejon drogi do betoniarni Rynarcice	Pojawiły się dziury na rurociągu stalowym DN 800 mm	Pospawanie łaty stalowej	Zmiana materiału rury stalowej na rurę stalową o lepszych parametrach ścieralnych. Zwiększenie klasy jakości połączeń spawanych. Użycie innego materiału rurociągu PEHD lub stali z wkładką trudnościeralną.
21	03.11.2023	Rejon drogi do betoniarni Rynarcice	Pojawiły się dziury na rurociągu stalowym DN 800 mm	Wymiana rury stalowej na dług. ok. L= 16 m	
22	04.11.2023	Rejon komory K-2	Pojawiły się dziury na rurociągu stalowym DN 800 mm	Wymiana rury stalowej na dług. ok. L= 27 m	

3.14. Zestawienie awarii rurociągów technologicznych wody przemysłowej na Pompowni Kalinówka

Tablica 3.14. Zestawienie awarii rurociągów technologicznych wody przemysłowej na Pompowni Kalinówka (dane źródłowe: Archiwum KGHM Polska Miedź S.A.)

Lp.	Data awarii	Lokalizacja awarii	Rodzaj awarii	Wykonane czynności naprawcze	Propozycja zastosowania metody naprawczej
1	29.12.2020	Rejon pomiędzy komorą KA, a KB	Przeciekający rurociąg	Pospawanie łaty stalowej	Zmiana materiału rury stalowej na rurę stalową o lepszych parametrach ścieralnych. Zwiększenie klasy jakości połączeń spawanych. Użycie innego materiału rurociągu np. PEHD lub stali z wkładką trudnościeralną.
2	16.03.2022	Rejon pomiędzy komorą KA, a KB	Przeciekający rurociąg	Montaż łaty stalowej	
3	17.03.2022	Rejon kolektora tłocznego strona A	Przeciekające zwężki stalowe DN 1400/1200 mm	Wymiana rury stalowej wraz ze zmiana średnicy	
4	25.03.2022	Rejon komory KA	Przeciekający rurociąg DN 1200 mm	Pospawanie łaty stalowej	
5	23.08.2022	Rejon komory WZ1	Przeciekająca kształtka trójnik	Pospawanie łaty stalowej	
6	06.11.2022	Rejon kolektora tłocznego za pompa P-5	Zalany silnik pompy	Wymiana silnika	
7	23.11.2022	Rejon komory KA	Przeciekająca kształtka przy trójniku	Pospawanie łaty stalowej	
8	26.08.2023	Rejon rurociągu tłocznego, strona B przy zasuwie Z-21	Pęknięty rurociąg na spawie hutniczym	Wymiana rury stalowej na dług. ok. L= 3 m	

3.15. Zestawienie awarii Odrzańskich rurociągów technologicznych wody przemysłowej

Tablica 3.15. Zestawienie awarii Odrzańskich rurociągów technologicznych wody przemysłowej o średnicy DN 800 mm i DN 700 mm (dane źródłowe: Archiwum KGHM Polska Miedź S.A.)

Lp.	Data awarii	Lokalizacja awarii	Rodzaj awarii	Wykonane czynności naprawcze	Propozycja zastosowania metody naprawczej
1	05.02.2018	Rejon komory K-4a	Przeciekająca armatura - przepustnica DN 800 mm ww. komorze	Wymiana przepustnicy	Zmiana materiału rury stalowej na rurę stalową o lepszych parametrach ścieralnych. Zwiększenie klasy jakości połączeń spawanych. Użycie innego materiału rurociągu np. PEHD lub stali z wkładką trudnościeralną.
2	01.08.2018	Rejon za komorą Żuków , w stronę rzeki Odra, za odwodnieniem nr 19	Przeciekający kompensator stalowy DN 800 mm	Wymiana kompensatora stalowego	
3	21.09.2018	Rejon komory K100/101	Przeciekający rurociąg odrzański DN 700 mm	Wstawiono nowy kompensator stalowy	
4	10.01.2019	Rejon odwodnienia w Guzicach	Przeciekający rurociąg odrzański DN 800 mm	Wymiana rurociągu stalowego o dług. L=12 m oraz wstawiono kompensator stalowy DN 800 mm	
5	19.01.2019	Rejon pomiędzy komorą Trzebcz i Żuków, za odpowietrznikiem o numerze 24a	Przeciekający kompensator stalowy DN 700 mm	Dokręcono kompensator stalowy	
6	24.01.2019	Rejon miejscowości Żuków	Przeciekający rurociąg odrzański DN 800 mm	Pospawanie łaty stalowej	
7	26.01.2019	Rejon miejscowości Żuków	Przeciekający rurociąg odrzański DN 700 mm	Pospawanie łaty stalowej	
8	25.05.2019	Rejon miejscowości Guzice, za odpowietrznikiem	Przeciekający kompensator stalowy DN 700 mm	Dokręcono kompensator stalowy	
9	13.06.2020	Rejon za komorą Trzebcz, w stronę rzeki Odry	Przeciekający rurociąg odrzański DN 800 mm	Pospawanie łaty stalowej	
10	17.06.2020	Rejon pomiędzy komorą Trzebcz i Żuków	Przeciekający rurociąg odrzański DN 800 mm	Pospawanie łaty stalowej	
11	27.08.2020	Rejon komory K4-a	Przeciekająca armatura – przepustnica DN 700 mm	Wymiana przepustnicy	

12	12.11.2020	Rejon odpowietrzników o numerze 23/23a w miejscowości Guzice	Przeciekający kompensator stalowy DN 700 mm	Wymiana pierścienia i śrub w kompensatorze stalowym	
13	26.11.2020	Rejon za komorą K4a, za przepustnicą DN 700 mm	Przeciekający rurociąg odrzański DN 700 mm	Pospawanie łaty stalowej	
14	08.02.2021	Rejon komory Świnino II, rejon przy przepustnicy Z-4 od strony rzeki Odry	Przeciekające połączenie rurociągu i armatury DN 70 mm	Pospawanie łaty stalowej	
15	21.02.2021	Rejon za odwodnieniem w stronę miejscowości Żuków	Przeciekający rurociąg odrzański DN 700 mm	Pospawanie łaty stalowej	
16	11.03.2021	Rejon osiedla Piastów, za odpowietrzeniem	Przeciekający kompensator stalowy DN 700 mm	Wymiana kolana stalowego	
17	18.03.2021	Rejon za komorą Trzebcz w kierunku rzeki Odry	Przeciekający rurociąg odrzański DN 800 mm	Pospawanie łaty stalowej	
18	26.04.2021	Rejon osiedla Piastów	Przeciekający rurociąg odrzański DN 700 mm	Pospawanie łaty stalowej	
19	14.06.2021	Rejon za komorą Trzebcz	Przeciekający rurociąg odrzański DN 700 mm	Pospawanie łaty stalowej	
20	27.07.2021	Rejon Szybu R-9	Przeciekający rurociąg odrzański DN 700 mm	Pospawanie łaty stalowej	
21	01.09.2021	Rejon za komorą 100/1001 w kierunku rzeki Odry	Przeciekający rurociąg odrzański DN 800 mm	Pospawanie łaty stalowej	
22	06.06.2022/ 08.06.2022/ 09.06.2022	Rejon komory K-1	Przeciekający rurociąg odrzański DN 800 mm	Pospawanie łat stalowych	
23	15.06.2022	Rejon komory K-1	Przeciekająca rurociąg odrzański DN 800 mm	Wymiana rury stalowej na dług. ok. L=2 m	
24	07.07.2022	Rejon komory Świnino II	Przeciekająca rurociąg odrzański DN 700 mm na spawie hutniczym	Pospawanie łaty stalowej	
25	11.08.2022	Rejon za Żukowem, za odpowietrznikiem o numerze 18	Przeciekająca rurociąg odrzański DN 800 mm	Pospawanie łaty stalowej	

26	13.10.2022	Rejon komory K-1	Przeciekający rurociąg odrzański DN 700 mm	Pospawanie łaty stalowej	
27	16.11.2022	Rejon komory Żuków, w kierunku komory Świnina	Pęknięty rurociąg DN 800 mm	Spawano wstawkę stalową	
28	25.11.2022	Rejon komory Żuków, w kierunku komory Świnina	Pęknięty rurociąg DN 700 mm	Spawano wstawkę stalową	
29	01.06.2023/ 24.06.2023	Rejon za odpowietrznikiem w stronę komory Świnina	Przeciekający kompensator stalowy DN 800 mm	Dokręcono kompensator stalowy	
30	02.08.2023	Rejon za odwodnieniem w stronę komory Żuków	Pęknięty rurociąg DN 800 mm	Pospawanie łaty stalowej	

4. ANALIZA I PODSUMOWANIE PRZYCZYN AWARII

4.1. Analiza ryzyka powstania awarii infrastruktury technicznej rurociągów

Celem oceny ryzyka awarii w odniesieniu do rurociągów jest możliwość powstania zagrożenia dla ludzi i środowiska oraz ciągłości dostaw. W niektórych krajach Europy zachodniej ocena ryzyka jest ujęta w różnych przepisach i normach.

W ocenie uwzględnia się różnorodne czynniki, w zależności od sytuacji, i tak np. uwzględnia się (Borysiewicz i Potempski, 2002):

- gęstość zaludnienia,
- niebezpieczeństwo transportowanych/przesyłanych substancji (np. gaz ziemny, ropa naftowa, ropopochodne),
- trasy rurociągów,
- odległość rurociągów od domów mieszkalnych.

Rurociągi w przypadku transportu odpadów poflotacyjnych na Obiekt Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych Żelazny Most uznaje się za jedną (jedyną) bezpieczną i ekonomiczną metodę transportowania. Rurociągi KGHM Polska Miedź S.A. są utrzymywane i kontrolowane przez jednego operatora, czyli KGHM Polska Miedź S.A. Oddział Zakład Hydrotechniczny.

Rurociągi transportujące niebezpieczne substancje potencjalnie stwarzają poważne ryzyko awarii. Uwolnienia palnych i toksycznych materiałów może zainicjować zdarzenie awarii o katastrofalnych efektach. Częstość awarii, rodzaj oraz rozmiar jej skutków zależy m.in. od transportowanej substancji oraz typu sieci. Analiza zaistniałych awarii pokazuje, że istotne znaczenie dla ograniczenia awarii i dla ochrony przed awariami ma systematyczna ich kontrola (Borysiewicz i Potempski, 2002).

Pośród niebezpiecznych mediów dominują gaz ziemny i produkty ropopochodne. Liczba awarii w transporcie gazu, ropy naftowej i jej pochodnych przesyłanych rurociągami zmniejsza się w ostatnich latach, ale zanotowano kilka awarii z poważnymi skutkami.

W systemach przesyłowych gazu zasadniczą przyczyną awarii była ingerencja z zewnątrz, podczas gdy korozja jest bardziej znacząca w rurociągach przesyłowych ropy naftowej i jej pochodnych. Koszty rozlewów ropy pozostają bardzo duże. Nadal istnieje

duże prawdopodobieństwo, że awarie związane z rurociągami w Europie i Stanach Zjednoczonych mogą powodować znaczne szkody.

Rurociągi są sklasyfikowane na linie przesyłowe, gromadzące i dystrybuujące. Linie przesyłowe przebiegają pod powierzchnią terenu lub pod lustrem wody, a substancje przepływają w nich pod wysokim ciśnieniem. Rurociągi lądowe tworzą główną strukturę istniejących sieci przesyłowych. Często w wyniku postępującej urbanizacji trudno jest utrzymać rurociągi z dala od miasta.

Do głównej struktury rurociągu należą (Borysiewicz i Potempski, 2002): terminale odbiorcze, zbiorniki pośrednich i dostawczych terminali, pompy i sprężarki, rozdzielnie, systemy tłoczne i odgałęzienia, stacje gromadzące, stacje licznikowe oraz inne stacje, takie jak zaworowe, dostawcze i kontroli szczelności, oraz pozostałe elementy.

Dane dotyczące awarii związanych z transportem rurociągami gazu i ropy są gromadzone na bazie wielu źródeł. Ograniczają się one do zdarzeń związanych z przesyłem substancji rurociągami lądowymi. Główna część zgromadzonych danych dotyczy incydentów związanych z rurociągami transportującymi naturalny gaz i produkty naftowe; jedynie niewielka ilość danych dotyczy uwolnień amoniaku, chloru oraz innych niebezpiecznych cieczy i gazów. Amerykańskie Ministerstwo transportu (DoT) podzieliło zgromadzone dane na dwie kategorie: dane dotyczące incydentów związanych z gazociągami oraz dane o awariach podczas przesyłania rurociągami niebezpiecznych cieczy (głównie ropy naftowej i produktów ropopochodnych). Istnieją również kryteria stosowane podczas tworzenia bazy danych CONCAWE (Europejska Organizacja Przedsiębiorstw Naftowych). Źródłami danych o awariach są na przykład bazy danych USA DoT, EGiG i CONCAWE.

Jak podają Borysiewicz i Potempski (2002), w przeszłości dla potrzeb przemysłu rurociągów gazu i ropy naftowej zdefiniowano kilka typów awarii, w zależności od ich przyczyn. Najczęściej wyróżnia się następujące kategorie awarii:

- zewnętrzny wpływ lub inne zdarzenie,
- korozja,
- błędy konstrukcyjne, wady mechaniczne lub materiałowe,
- ruchy ziemi lub inne naturalne niebezpieczeństwa,
- błędy operacyjne,
- inne lub nieznane przyczyny.

Wymienia się najczęściej pęknięcie z przeciążenia, błędy spawania, wewnętrzną lub zewnętrzną korozję, pęknięcia, naruszenia, złamania. Czynnik zewnętrzny, głównie

działania zewnętrzne, w tym wpływ używanych innych urządzeń, został uznany za podstawową przyczynę awarii, zarówno rurociągów gazowych, jak i ropy naftowej.

Korozja, to kolejna główna przyczyna incydentów. W większości dotyczy starzejących się rurociągów, zaś błędy konstrukcyjne i materiałowe często łączą się ze sprzętem czy wyposażeniem współpracującym z rurociągiem. Mimo, iż metody detekcji defektów są obecnie powszechne i mogą zapobiec awarii, problem ten jest nadal aktualny w dużych i starych sieciach.

Z analizy awarii związanych z rurociągami wynika, że wycieki ropy najczęściej powodują zniszczenie środowiska, zaś uwolnienia gazu z zapłonem są zagrożeniem dla zdrowia ludzi.

W działaniach na rzecz zmniejszenia ryzyka wystąpienia awarii na obszarach o wzrastającej gęstości zaludnienia, można wykorzystać rekomendacje sformułowane w następstwie wielu awarii, w tym m.in. po awarii w Duff Street (Borysiewicz i Potempski, 2002), w których zalecono:

- zwiększenie głębokości, na której przebiegają rurociągi (większa grubość pokrywy gruntu niż 100 cm, daje w efekcie mniejszą interferencję),
- niższe limity ciśnienia operacyjnego,
- zwiększenie grubości ścianek rur,
- zwiększenie dozwolonej minimalnej odległości między budynkami i rurociągami.

Rozwiązania techniczne i organizacyjne dla bezpieczeństwa rurociągów

Dla systemów rurociągów przesyłowych, aby wykonać analizę ryzyka, należy w pierwszym etapie zapoznać się z systemem funkcjonowania i wzajemnymi zależnościami. Należy rozeznać:

- zasady, normy i regulacje, ważne dla całego systemu rurociągu, tj. czy przyjęto pewien wzorzec minimum wymagań o określonej strukturze działów, np. ogólne zasady, materiały, założenia projektowe dotyczące rur, wymagania dotyczące konstrukcji rurociągu: rur, stacji pomp, zaworów, urządzeń kontrolno-pomiarowych, spawania i łączenia elementów, itp.;
- ostatecznie przyjęte rozwiązania techniczne; tj. jakie środki techniczne i proceduralne są zrealizowane celem zapobiegania awariom i minimalizacji ich skutków, zarówno w wypadku samego rurociągu, jak i innych elementów systemu rurociągu: stacje pomp, zawory, zbiorniki i upusty bezpieczeństwa, systemy kontrolno-pomiarowe, systemy alarmowania, zapewnienie niezawodnego

zasilania w energię elektryczną koniecznych napędów i urządzeń pomiarowych, urządzenia do zapobiegania nadciśnieniu, pożarom i wybuchom,

- przyjęte lub opracowywane procedury eksploatacji, obejmujące m.in. zasady prowadzenia testów, konserwacji, napraw, program ochrony przed uszkodzeniami ze strony trzeciej, program zarządzania korozją, program kontroli grubości warstwy przykrywającej rurociąg lub innych rozwiązań chroniących rurociąg przed uszkodzeniem, prognozowanie zmęczenia materiałowego w wyniku wahań ciśnienia, związanych z błędami w eksploatacji, itp.,
- plany postępowania awaryjnego.

System rurociągu przesyłowego substancji niebezpiecznych zwykle ma wdrożone liczne systemy techniczne i organizacyjne zapobiegania awariom i zachowania bezpieczeństwa i ochrony ludzi i środowiska.

Do najważniejszych środków służących do zapobiegania rozszczelnieniu rurociągu zalicza się (Borysiewicz i Potempski, 2002):

- zapewnienie maksymalnie bezpiecznego przebiegu trasy rurociągu,
- zgodność wykonania obliczeń projektowych, doboru materiału, armatury, konstrukcji rurociągu i wykonania rurociągu z dobrą praktyką inżynierską,
- wprowadzenie wyższej wytrzymałości rurociągu poprzez naddatki grubości ścianki, próby szczelności i wytrzymałości,
- monitoring stanu technicznego przez badanie geometrii rurociągu,
- badanie radiograficzne wszystkich spoin obwodowych wykonanych w trakcie budowy rurociągu,
- wykonanie spoin w odpowiedniej klasie,
- komputerowy system pomiarów i automatyki: pomiar natężenia przepływu, pomiar ciśnienia, pomiar temperatury,
- materace gabionowe nad rurociągiem w kilometrach tras,
- kompensacja wydłużeń cieplnych na naziemnych częściach rurociągu,
- utwardzenia szczelne gruntu pod armaturą i urządzeniami instalacji technologicznej,
- dobór rur ze stali o podwyższonej wytrzymałości,
- podsypkę piaskową pod rurociągiem w gruntach twardych, skalnych, a do zasypywania rurociągu warstwę gruntu miękkiego,
- ochronę antykorozyjną – bierną i czynną.

Do biernej ochrony antykorozyjnej zalicza się:

- dla rurociągów podziemnych: styki spawane izolowane taśmami polietylenowymi trójwarstwowymi; zewnętrzna powierzchnia rur przeciskowych i wewnętrzna rury ochronnej pokryta farbą epoksydową,
- dla rurociągów naziemnych: piaskowanie, pokrycie farbą epoksydowo-poliuretanową.

Do czynnej ochrony antykorozyjnej zalicza się m.in.: elektrochemiczną ochronę przed korozją (stacje ochrony katodowej zamontowane w budynkach stacji zasuw), słupki kontrolno-pomiarowe w odległości 2,0 m od osi rurociągu po jego lewej stronie, czujniki ruchu na terenie i w budynku stacji zasuw, okresowe konserwacje i remonty, kontrolę stanu technicznego Urzędu Dozoru Technicznego UDT, wymaganie szkoleń pracowników w zakresie BHP i przeciwpożarowym.

Dla bezpiecznej bezawaryjnej pracy rurociągu przesyłowego ważny jest system łączności i automatyki. Funkcje tego systemu to zarówno zapobieganie uwolnieniom, jak i ochrona przed skutkami uwolnień i minimalizacja tych skutków dla otoczenia.

Analiza potencjalnych skutków awarii

Skutki awarii mogą być oszacowane zarówno ilościowo, jak i jakościowo. W analizie skutków awarii należy wziąć pod uwagę takie czynniki, jak (Borysiewicz i Potempski, 2002):

- ilość substancji, która może być uwolniona,
- różne mechanizmy dyspersji i drogi narażenia,
- ilość substancji, która może mieć wpływ na ludzi i środowisko, oraz na brak ciągłości dostaw
- oczekiwane efekty uwolnienia.

Analizując możliwe skutki awarii rurociągów, należy wziąć pod uwagę różne potencjalne zdarzenia, takie jak:

- normalne operacje,
- wycieki z rur,
- pęknięcia rur,
- pęknięcia rur oraz zapłon substancji,
- przyczyny konstrukcyjne.

Analiza potencjalnych zdarzeń awaryjnych powinna obejmować następujące kategorie ich skutków:

- **bezpieczeństwo i zdrowie człowieka** – m.in. pożary i wybuchy, krótkoczasowa ekspozycja na utworzone pary, długoczasowa ekspozycja na skażenie gleby, wód gruntowych i powierzchniowych, ekspozycja poprzez wdychanie toksycznych substancji,
- **wody gruntowe** – m.in. wycieki natychmiastowe, wycieki ciągłe, przeszkody spowodowane zerwaniem rurociągu, ukształtowanie terenu,
- **biologię wód** – krótko- i długoterminowe efekty dla występujących gatunków, zwłaszcza ryb, możliwość zmiany warunków wegetacji wskutek zwiększonej toksyczności, długoczasowe zmiany sedymentacyjne,
- **biologię lądową** – dominujące gatunki zamieszkałe w pasie wokół rurociągu, możliwość bioakumulacji toksycznych składników wycieku, co może mieć wpływ na zmiany w populacji występujących gatunków roślin i zwierząt,
- **wody powierzchniowe** – należy zwrócić uwagę na miejsca, w których rurociąg przechodzi nad lub pod wodą, oszacować możliwe skażenia powstałe również w dopływach, uwzględnić skutki dla populacji występujących gatunków,
- **jakość powietrza** – należy podać wartość emisji dla podstawowych substancji, takich jak: ozon, związki ołowiu, tlenek węgla, dwutlenek siarki, dwutlenek azotu oraz produkty szybkich emisji,
- **geologię**,
- **gleby**,
- **transport** – trzeba wyselekcjonować części dróg transportowych położonych w pobliżu trasy rurociągu i zwrócić uwagę na stopień ich wykorzystania, a w przypadku awarii trzeba oszacować ewentualne straty związane z koniecznością zamknięcia drogi, naprawy, itp.,
- **pokrycie terenu** – należy wyselekcjonować obszary naturalnych parków, tereny miejskie, itp.,
- **hałas**

Jak potwierdzają Borysiewicz i Potempski (2002) oraz Wiśniewski (1996), Michalik i Domański (2002), Revie i Uhling (2008), Borysiewicz i in. (2020), analizę ryzyka poważnych awarii rurociągu przesyłowego przeprowadza się w dwóch etapach, tj.: na początku szacuje się ryzyko względne z wykorzystaniem czynników wpływających na prawdopodobieństwo awarii (czynniki zewnętrzne, w tym interwencja osób trzecich,

korozja, czynniki projektowe, niewłaściwe operacje), a następnie przeprowadza się szczegółowe oszacowania ryzyka, w tym wielkości zasięgu i skutków dla segmentów rurociągu i instalacji towarzyszących, które mają dominujący wkład do ryzyka całkowitego.

4.2. Analiza przyczyn awarii infrastruktury technicznej odpadów poflotacyjnych w latach 2018÷2023

W Rozdziale 3 pracy zestawiono awarie infrastruktury technicznej tłoczącej odpady poflotacyjne oraz wodę technologiczną pochodzącą z sedymentacji odpadów, i procesu wydobywczego na poszczególnych kopalniach KGHM Polska Miedź S.A. zaś w Załączniku Z.2. przedstawiono mapę lokalizacji awarii na sieci hydrotransportu odpadów poflotacyjnych rudy miedzi.

Przeanalizowano zestawione w Rozdziale 3, w tablicach 3.1÷3.15, awarie na sieci technologicznej, stwierdzając, że w przeważającej liczbie awarii (80%) są to awarie na rurociągach stalowych, które powstały w wyniku pękniętych na szwach połączeń spawanych, w wyniku korozji tych połączeń, z uwagi na powstałe wżery na źle wykonanych połączeniach, tj. bez pełnego przetopu, bądź z powodu znacząco wytartej ścianki rury w związku z wieloletnią jej eksploatacją i zużyciem.

Na częstość występowania awarii ma również wpływ jakość materiału rur stalowych wyprodukowanych w hucie, którą określa się poprzez odpowiednią zawartość w materiale rury m.in. takich pierwiastków, jak: krzem i mangan, które powinny zapobiegać ścieralności rury, tym samym zmniejszając jej degradację.

Aby zminimalizować sytuacje awaryjne, które występują na sieciach infrastruktury technicznej odpadów poflotacyjnych, potwierdza się skuteczne zastosowanie poniższych materiałów odporniejszych na dużą ścieralność płynącego medium, w tym na korozję, do doboru produkcji rur, służących do hydrotransportu odpadów poflotacyjnych na Obiekt Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych OUOW Żelazny Most oraz Kwaterę Południową. Poniżej wymieniono wybrane rozwiązania techniczne, zweryfikowane na sieciach, do zastosowania:

– rury z tworzywa sztucznego PEHD – polietylenu wysokiej gęstości według normy PN-EN ISO 15494:2018-12, charakteryzujące się dużą odpornością na ścieralność,

– rury stalowe z większą zawartością składników odpornych na ścieranie, m.in. z większą zawartością manganu, krzemu, fosforu, siarki, chromu, molibdenu, niklu, aluminium, miedzi, tytanu, wanadu,

– rury stalowe ze stali nierdzewnej według normy PN-EN 10088-1:2024-06,

– rury stalowe bez szwu, o gatunku:

a) stali trudnościeralnej z powłoką wewnętrzną z węglików chromu,

b) stali nierdzewnej: austenitycznej m.in. duplex 1.4462, super duplex 1.4410 - z dużą zawartością chromu, molibdenu i azotu, charakteryzująca się wysoką odpornością na korozję

c) stali z powłoką wewnętrzną trudnościeralną m.in.: gumową, ceramiczną, powłoką z chromu lub niklu wykazującą się lepszymi właściwościami wytrzymałościowymi z powodu mniejszej liczby połączeń materiału; dobór odpowiedniego rodzaju stali jest zależny od parametrów technologicznych płynącego medium oraz od miejsca zabudowy w sieci technologicznej,

– rury stalowe z wyłożeniem wewnątrz rury wykładziną trudnościeralną typu:

a) twarde wykładziny betonowe m.in. DENSIT lub ceramiczne, charakteryzujące się wysoką odpornością na ścieranie, temperaturę. Stosowane na załamaniach rurociągu magistralnego m.in. kolanach, łukach lub wpięciach do sieci (węzłach, komorach) np. trójkach, zwężkach, itp.

b) wykładziny poliuretanowe m.in. PUGA, gumowe, twarde elastomery odporne na ścieranie i uderzenia hydrauliczne. Korzystne stosowanie w warunkach o niższej temperaturze płynącego medium i niższym ciśnieniu w układzie, z odpowiednio dobranym składem danego kompozytu i grubością danej powłoki.

Dobór powyższych rodzajów wykładzin trudnościeralnych jest uzależniony od:

– właściwości płynącego medium, w tym zawartości w nim ciał stałych, uziarnienia, składu mineralogicznego,

– parametrów hydrotransportu, m.in. od prędkości przepływu,

– warunków pracy danego układu jak m.in. ciśnienie w sieci, temperatura, czasookres pracy układu.

W celu ograniczenia awarii infrastruktury technicznej oprócz wdrożenia stosowania rozwiązań materiałowych dla rurociągów technicznych, w zależności od panujących warunków terenowych, ciśnieniowych, rodzaju tłoczonego medium oraz utrzymania

ruchu, zaleca się również zmianę warunków obracania odcinków rury stalowej wokół własnej osi, poprzez wdrożenie: obracania z większą częstotliwością, ale o mniejszym wartości kąta, np. co 30° - 45° (najlepiej obracanie co drugą/trzecią rurę w kierunkach przeciwnych), jak również odpowiednie planowanie robót na podstawie systematycznego badania stanu technicznego zużycia ścianek rurociągów przesyłowych, magistralnych, w tym systematycznego badania zużycia armatury (m.in. zasuw, przepustnic, kompensatorów, itp.).

Dodatkową czynnością minimalizującą pojawiające się awarie jest również opomiarowanie i monitoring parametrów technicznych płynącego medium w kolektorze, kontrola ciśnienia, m.in. poprzez właściwie dobrane i zamontowane przetworniki ciśnienia, a następnie przez natychmiastowe działanie na pojawiające się nieprawidłowe wskazania pomiarowe.

Aby odpowiednio zareagować na niepożądane wartości ciśnień w rurociągach, należy systematycznie w istotnych dla bezawaryjności sieci punktach lokalizacji przetworników dokonywać bieżących odczytów, systematycznie prowadzić raporty pomiarów ciśnienia, w tym również pomiary różnicy ciśnień, prędkości przepływu, ilości płynącego medium, jego gęstości, z uwzględnieniem szczególnych miejsc pomiarowych, takich jak m.in.: załamania, kolana występujące na trasie, lokalizacje na sieci podpór stałych i przesuwnych, lokalizacje przepustów oraz miejsc o zróżnicowanych rzędnych terenu, przez które przebiega trasa rurociągu.

5. BADANIA TERENOWE I LABORATORYJNE INFRASTRUKTURY TECHNICZNEJ ODPADÓW POFLOTACYJNYCH

W rozdziale 5 zestawiono wykonane badania terenowe i laboratoryjne infrastruktury technicznej tłoczącej odpady poflotacyjne z Zakładów Wzbogacania Rud ZWR na Obiekt Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych OUOW Żelazny Most. Przedstawiono rurociągi o średnicy DN 1000 mm, które uległy awariom oraz te, które zostały przeznaczone do wymiany na sieci technologicznej. Na wybranych fotografiach podano przyczyny powstałych awarii infrastruktury technicznej.

W rozdziale 5 pokazano również wycięte próbki do badań z rurociągu odpadów poflotacyjnych z Zakładu Wzbogacania Rud ZWR Rudna, które pobrano wyrywkowo w rejonie komory rozrządu RG celem weryfikacji stanu zużycia rurociągu i oceny możliwości dalszej eksploatacji sieci.

Przykłady wybranych rur stalowych, które uległy awariom zostały przedstawione na Fot. 5.1÷5.5 oraz Fot. 5.12÷5.14.

Fot. 5.1. Rury stalowe o średnicy DN 1000 mm po awarii rurociągów magistralnych odpadów poflotacyjnych: R1, rejon kompensatora K47/K48, R1 rejon K17/K18, R3, rejon K18/K19 (fot. własna)

Fot. 5.2. Rury stalowe o średnicy DN 1000 mm z awarii rurociągów magistralnych odpadów poflotacyjnych: R1 rejon kompensatora K40. Widoczny pęknięty szew na rurze stalowej, korozja rury stalowej oraz liczne wżery w ściance rury stalowej (fot. własna)

Fot. 5.3. Rura stalowa o średnicy DN 1000 mm po awarii rurociągu magistralnego odpadów poflotacyjnych R1: rejon kompensatora K9. Widoczny pęknięty szew na rurze stalowej oraz pęknięty szew w rejonie strefy grzania w miejscu połączenia spawanego rury stalowej (fot. własna)

a)

b)

Fot. 5.4. Pęknięty szew na rurociągu magistralnym R1 o średnicy DN 1000 mm; rejon kompensatora stalowego K41, awaria z 2022 roku (fot. własne)

a)

b)

Fot. 5.5. Przekroje cienkiej ścianki rurociągu magistralnego R1 o średnicy DN 1000 mm, który uległ awarii w rejonie kompensatora stalowego K41, awaria z 2022 roku (fot. własne)

5.1. Metoda obserwacyjna jakościowa

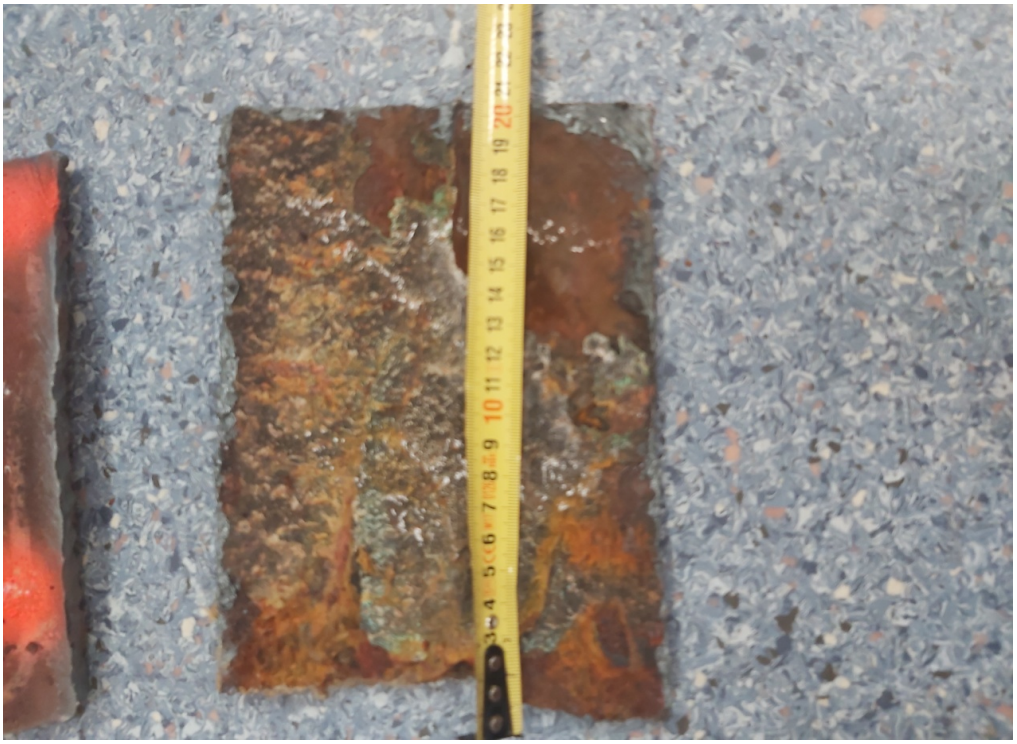
W terenie wycięto próbki z rurociągów magistralnych odpadów poflotacyjnych o średnicy DN 1000 mm na odcinkach, które uległy awariom oraz na odcinkach przeznaczonych do remontów i wymiany infrastruktury technicznej.

Powyższe prace zostały wykonane w celu analizy stanu rurociągu magistralnego tłoczącego odpady poflotacyjne, jak również w celu analizy przyczyn zaistniałych awarii na sieci technologicznej. W kolejnym etapie badań terenowych po wycięciu próbek, opisano je oraz przewieziono do laboratorium celem dokonania dokładnych oględzin. Wyniki pomiarów próbek zestawiono w formie tabelarycznej, tj. sporządzono protokół z badań wizualnych (por. Tablica 5.1). W rozdziale 5.1 pokazano również fotografie wyciętych próbek.

a)

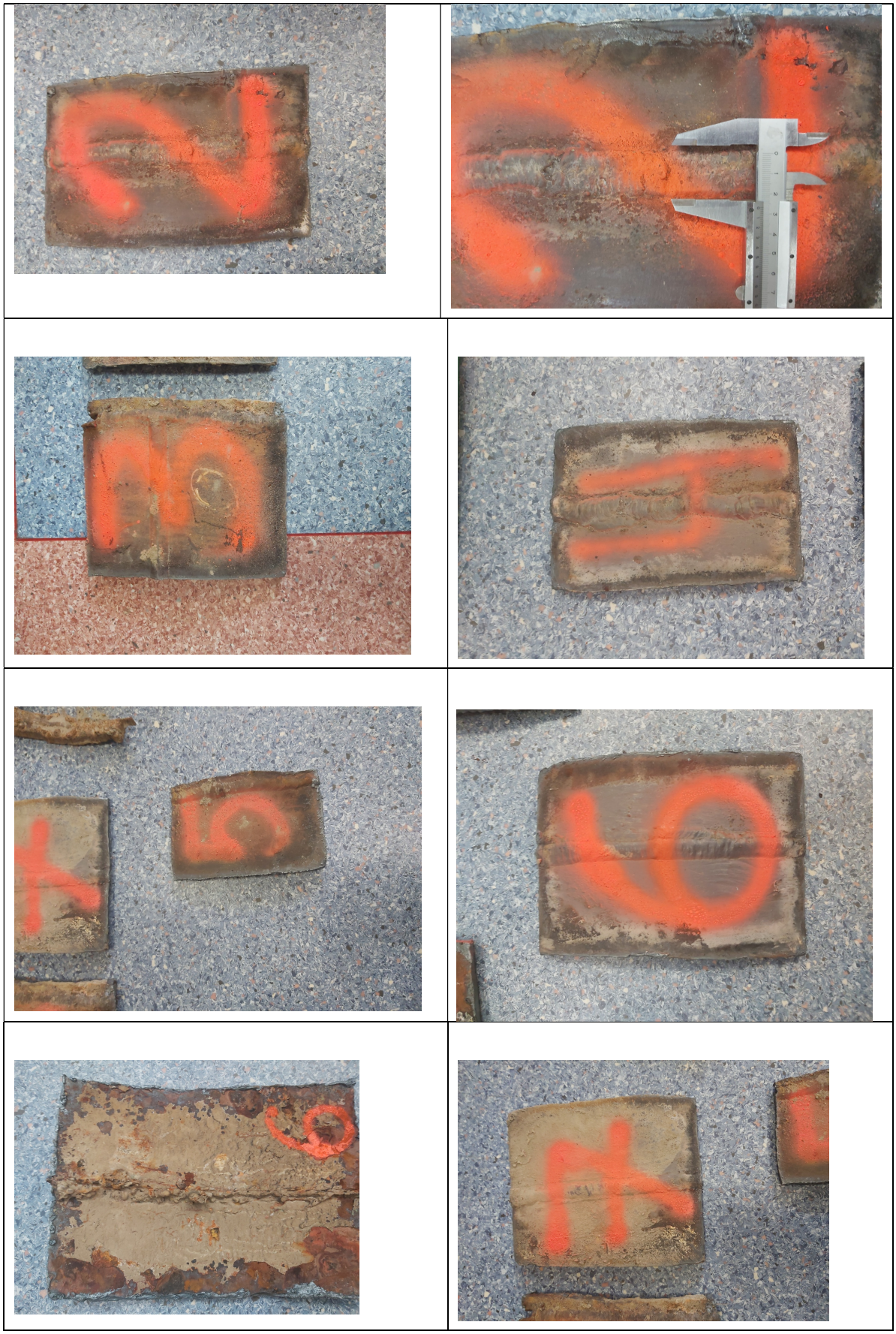
b)

Fot. 5.6. Wycięte próbki z rurociągu magistralnego R1 o średnicy DN 1000 mm, który uległ awarii, przeznaczonego do remontu oraz wymiany, w rejonie od komory RG w kierunku węzła „Z" na OUOW Żelazny Most, a) widok zewnętrznej części rury stalowej, b) widok wewnętrznej części rury stalowej (fot. własne)



Fot. 5.7. Widok korozji na próbce pomiarowej wyciętej z rurociągu stalowego R1, który został przeznaczony do wymiany ze względu na cienką ściankę o grubości 6 mm (fot. własna)

Fot. 5.8. Widok połączeń spawanych na próbkach wyciętych z rurociągu stalowego R1, które uległy awarii i zostały przeznaczone do wymiany ze względu na brak przetopu po całym obwodzie (fot. własna)



Fot. 5.9. Próbki do badań o wybranych numerach; przekrój połączenia spawanego metodą 111 – elektrodą otuloną (fot. własne)

a)

b)

c)

d)

Fot. 5.10. Widok korozji na próbce pomiarowej wyciętej z rurociągu stalowego, który został przeznaczony do wymiany; a)÷c) ścianka rury grubości 6 mm - widok połączenia spawanego w warstwie przetopu oraz miejscowy brak przetopu; d) korozja wżerowa rury i w miejscach połączenia spawanego (fot. własne)

Tablica 5.1. Zestawienie pomiarów badań wizualnych z pobranych próbek po awarii rurociągu odpadów poflotacyjnych R1 do wymiany instalacji technologicznej; rejony od komory RG w kierunku węzła Z na OUOW Żelazny Most

Protokół badań wizualnych Nr 1 **Część 1.**
Warunki badań wizualnych
1. Nr i tytuł procedury badawczej: PB Nr 1 - Badania wizualne złącza spawanego z próbek od nr 1 do nr 6 2. Przedmiot badań: Próbki od nr 2 do nr 7 3. Numer identyfikacyjny badającego: DI 4. Gatunek i grubość materiału podstawowego: STAL, 16 mm 5. Metody spawania i opis stanu powierzchni: metoda 111, spawanie elektrodą otuloną 6. Wyposażenie badawcze do badań wizualnych: a) suwmiarka b) spoinomierz c) przymiar liniowy d) latarka e) lupa 7. Wykonujący badania: Iwona Duszyńska 8. Ocena według normy: PN-EN ISO 5817:2023-08 Spawanie -- Złącza spawane ze stali, niklu, tytanu i ich stopów (z wyjątkiem spawanych wiązką). Poziomy jakości według niezgodności spawalniczych 9. Uwagi dodatkowe: a) Norma badania: PN EN ISO 17637:2011 Badania nieniszczące złączy spawanych. Badania wizualne złączy spawanych b) Zakres badań: 100% długości złącza + SWC (Strefa Wpływu Ciepła) 10 mm/Strona c) Warunki badań: natężenie oświetlenia 500 luksów [lx], temperatura badań 22°C 10. Wyniki badań: wyspecyfikowane w nw. części 2 protokołu

Protokół badań wizualnych Nr 1

Część 2.

Wyniki badań wizualnych

Lp.	Opis złącza spoiny:		Niezgodności spawalnicze wg PN-EN ISO 6520-1:2009					Poziom jakości wg PN-EN ISO 5817:2023-08	Ocena spoiny
	Oznaczenie	Grubość [mm]	2025	5012/ 5011 *	502	2017/ 507*	402		
1.	Próbka nr 2	8	X	X	X	X	X	D	Negatywna
2.	Próbka nr 3	6	X	X		X	X	D	Negatywna
3.	Próbka nr 4	8		X/X	X	X	X	D	Negatywna
4.	Próbka nr 5	8	X	X		X		D	Negatywna
5.	Próbka nr 6	6				X/X		C	Pozytywna
6.	Próbka nr 7	8		X		X	X	D	Negatywna

Objaśnienia niezgodności według normy PN-EN ISO 6520-1:2009

Klasyfikacja niezgodności spawalniczych:

Grupa nr 1 Pęknięcia

Nr Odniesienia: 100 – Opis: Pęknięcie, 101 – Pęknięcie podłużne, 102 – Pęknięcie poprzeczne, 103 – Pęknięcie promieniowe, 104 – Pęknięcie w kraterze, 105 – Grupa oddzielnych pęknięć, 106 – Pęknięcia rozgałęzione, Pęknięcie promieniowe

Grupa nr 2 Pustki:

Nr Odniesienia: 200 – Opis: Pustka, 201 – Pustka gazowa, 2011 – Pęcherz gazowy, 2017 – Por, 2024 – Krater, 2025 – Otwarte wgłębienie w kraterze

Grupa nr 3 Wtrącenia stałe

Nr Odniesienia: 300 – Opis: Wtrącenie stałe, 301- Wtrącenie żużla, 302 – Wtrącenie topnika

Grupa nr 4 Przyklejenie i brak przetopu

Nr Odniesienia: 400 – Opis: Przyklejenie i brak przetopu, 401- Przyklejenie (brak wtopienia), 402 – Brak przetopu (niepełny przetop), 4021 – Niepełne przetopienie grani, 403 – wtopienie kolcowe

Grupa nr 5 Niezgodności spawalnicze dotyczące kształtu i wymiarów

Nr Odniesienia: 500 – Opis: Niezgodność kształtu, 501- Podtopienie, 5011 – Podtopienie ciągłe,
5012 – Podtopienie przerywane, 5013 – Podtopienie grani, 5014 – Podtopienie międzyściekowe, 502 – Nadlew spoiny, 503 – Nadmierna wypukłość, 504 – Wyciek, 505 – Niewłaściwy brzeg, 506 – Nawis, 507 – Przesunięcie liniowe , 508 – przesunięcie kątowe

Grupa nr 6 Niezgodności spawalnicze różne

Nr Odniesienia: 600 – Opis: Niezgodność spawalnicze różne, 613 – Powierzchnia ze zgorzeliną,
615 –Pozostałość żużla, 618 – Garb

II. Objaśnienia poziomów jakości wg PN-EN ISO 5817:2023-08

B – poziom jakości najwyższy
C – poziom jakości średni
D – poziom jakości najniższy
Założenia: poziom jakości B

Próbka Nr 2									
Dane wyjściowe									
Materiał	**Grubość materiału [mm]**	**Grubość nominalna spoiny [mm]**	**Długość Złącza [m]**	**Metoda spawania**	**Rodzaj ukosowania**				
STAL	**8,00**	**8,00**	**0,4**	**111 (spawanie elektrodą otuloną)**	**V (spoina czołowa)**				
Wyszczególnienie niezgodności:			**Wartość dopuszczalna [mm] niezgodności dla poziomu jakości:**			**Poziom jakości ze względu na występujące niezgodności**			
Oznaczenie	**Określenie**	**Wartość zmierzona**	**B**	**C**	**D**	**B**	**C**	**D**	**NSD**
2025	**Zakończenie krateru**	**h=1,5 mm**	**Nie dopuszcza się**	**1,00**	**2,00**			**X**	
5012	**Podtopienie spoiny czołowej**	**h=1,5 mm**	**0,50**	**0,50**	**1,00**				**X**
502	**Nadlew spoiny**	**h=6,0 mm**	**5,00**	**7,00**	**10,00**		**C**		
2017	**Pęcherz powierzchniowy**	**d=4,0 mm**	**Nie dopuszcza się**	**2,00**	**3,00**				**X**
402	**Brak przetopu**	**h=4,0 mm**	**Nie dopuszcza się**	**Nie dopuszcza się**	**2,00**				**X**
Uwagi:				**Poziom jakości złącza: NSD – spoina nie spełnia żadnych wymagań jakościowych**					

Próbka Nr 3									
Dane wyjściowe									
Materiał	**Grubość materiału [mm]**	**Grubość nominalna spoiny[mm]**	**Długość Złącza [m]**	**Metoda spawania**	**Rodzaj ukosowania**				
STAL	**6,00**	**6,00**	**0,3**	**111 (spawanie elektrodą otuloną)**	**V (spoina czołowa)**				
Wyszczególnienie niezgodności:			**Wartość dopuszczalna [mm] niezgodności dla:**			**Poziom jakości ze względu na występujące niezgodności:**			
Oznaczenie	**Określenie**	**Wartość zmierzona**	**B**	**C**	**D**	**B**	**C**	**D**	**NSD**
2025	**Zakończenie krateru**	**h=1,5 mm**	**Nie dopuszcza się**	**1,00**	**2,00**			**X**	
511	**Wklęśnięcie lica**	**h=3,0 mm**	**0,5**	**1,00**	**2,00**				**X**
402	**Brak przetopu**	**h=3,0 mm**	**Nie dopuszcza się**	**Nie dopuszcza się**	**2,0**				**X**
2017	**Pęcherz powierzchniowy**	**d=3,0 mm**	**Nie dopuszcza się**	**2,00**	**3,00**			**X**	
Uwagi:				**Poziom jakości złącza: NSD**					

Próbka Nr 4									
Dane wyjściowe									
Materiał	**Grubość materiału [m]**	**Grubość nominalna spoiny [mm]**	**Długość Złącza [m]**	**Metoda spawania**	**Rodzaj ukosowania**				
STAL	**8,00**	**8,00**	**0,3**	**111 (spawanie elektrodą otuloną)**	**V (spoina czołowa)**				
Wyszczególnienie niezgodności:			**Wartość dopuszczalna [mm] niezgodności dla :**			**Poziom jakości ze względu na występujące niezgodności**			
Oznaczenie	**Określenie**	**Wartość zmierzona**	**B**	**C**	**D**	**B**	**C**	**D**	**NSD**
5012	**Podtopienie spoiny czołowej**	**h=1,5 mm**	**0,5**	**0,5**	**1,00**				**X**
502	**Nadlew spoiny**	**h=6,0 mm**	**5,0**	**7,00**	**10,00**		**X**		
402	**Brak przetopu**	**h=3,0 mm**	**Nie dopuszcza się**	**Nie dopuszcza się**	**2,00**				**X**
2017	**Pęcherz powierzchniowy**	**d=4,0 mm**	**Nie dopuszcza się**	**2,0**	**3,0**				**X**
511	**Wklęśnięcie lica**	**h=2,0 mm**	**0,5**	**1,00**	**2,00**			**X**	
Uwagi:				**Poziom jakości złącza: NSD – spoina nie spełnia żadnych wymagań jakościowych**					

Próbka Nr 5									
Dane wyjściowe									
Materiał	**Grubość materiału [mm]**	**Grubość nominalna spoiny [mm]**	**Długość Złącza [m[**	**Metoda spawania**	**Rodzaj ukosowania**				
STAL	**8,00**	**8,00**	**0,3**	**111 (spawanie elektrodą otuloną)**	**V (spoina czołowa)**				
Wyszczególnienie niezgodności:			**Wartość dopuszczalna[mm] niezgodności dla:**			**Poziom jakości ze względu na występujące niezgodności:**			
Oznaczenie	**Określenie**	**Wartość zmierzona**	**B**	**C**	**D**	**B**	**C**	**D**	**NSD**
2025	**Zakończenie krateru**	**h=1,0 mm**	**Nie dopuszcza się**	**1,00**	**2,00**		**X**		
511	**Wklęśnięcie lica**	**h=2,0 mm**	**0,5**	**1,00**	**2,00**			**X**	
2017	**Pęcherz powierzchniowy**	**d=3,0 mm**	**Nie dopuszcza się**	**2,00**	**3,00**			**X**	
Uwagi:				**Poziom jakości złącza: NSD**					

Próbka Nr 6									
Dane wyjściowe									
Materiał	**Grubość materiału [mm]**	**Grubość nominalna spoiny [mm]**	**Długość Złącza [m]**	**Metoda spawania**	**Rodzaj ukosowania**				
STAL	**6,00**	**6,00**	**0,5**	**111 (spawanie elektrodą otuloną)**	**V (spoina czołowa)**				
Wyszczególnienie niezgodności:			**Wartość dopuszczalna[mm] niezgodności dla:**			**Poziom jakości ze względu na występujące niezgodności:**			
Oznaczenie	**Określenie**	**Wartość zmierzona**	**B**	**C**	**D**	**B**	**C**	**D**	**NSD**
2017	**Pęcherz powierzchniowy**	**d=3,0 mm**	**Nie dopuszcza się**	**2,00**	**3,00**		**X**		
507	**Przesunięcie liniowe**	**h=3,0 mm**	**2,00**	**3,00**	**4,00**		**X**		
Uwagi:				**Poziom jakości złącza:** **NSD – spoina nie spełnia żadnych wymagań jakościowych**					

Próbka Nr 7									
Dane wyjściowe									
Materiał	**Grubość materiału [mm]**	**Grubość nominalna spoiny [mm]**	**Długość Złącza [m]**	**Metoda spawania**	**Rodzaj ukosowania**				
STAL	**8,00**	**8,00**	**0,4**	**111 (spawanie elektrodą otuloną)**	**V (spoina czołowa)**				
Wyszczególnienie niezgodności:			**Wartość dopuszczalna[mm] niezgodności dla:**			**Poziom jakości ze względu na występujące niezgodności:**			
Oznaczenie	**Określenie**	**Wartość zmierzona**	**B**	**C**	**D**	**B**	**C**	**D**	**NSD**
2017	**Pęcherz powierzchniowy**	**d=3,0 mm**	**Nie dopuszcza się**	**2,00**	**3,00**			**X**	
402	**Brak przetopu**	**h=3,0 mm**	**Nie dopuszcza się**	**Nie dopuszcza się**	**2,0**				**X**
511	**Wklęśnięcie lica**	**h=3,0 mm**	**0,5**	**1,00**	**2,00**				**X**
Uwagi:				**Poziom jakości złącza:** **NSD – spoina nie spełnia żadnych wymagań jakościowych**					

5.2. Badania ultradźwiękowe

W terenie wykonano pomiary połączeń spawanych metodą ultradźwiękową defektoskopem ultradźwiękowym. W pierwszym etapie bazowano na defektoskopie ultradźwiękowym DIO 1000 firmy STARMANS Electronics s.r.o., posiadającym automatyczny pomiar grubości, kalibracji, na badaniu głowicami EMAT (Elektro Magnetic Acoustic Transducer) oraz na badaniu metodą TOFD (BW) (Time of Flight Diffraction). Do badań ultradźwiękowych wykorzystano również sprzęt DIO 562 firmy STARMANS. Dokonano pomiarów na rurociągach magistralnych odpadów poflotacyjnych o średnicy DN 1000 mm i DN 800 mm, na odcinkach, które uległy awariom oraz na odcinkach przeznaczonych do remontów i wymian. Po wyszlifowaniu połączeń spawanych przystąpiono do przeprowadzenia poszczególnych badań ultradźwiękowych. Poniżej zamieszczono fotografie pokazujące defektoskop ultradźwiękowy DIO 1000 oraz DIO 562 (Fot. 5.11) oraz przeprowadzanie pomiarów połączeń spawanych (Fot. 5.12÷5.14). Przykłady protokołów z badań ultradźwiękowych przedstawiono w Tablicy 5.2.

a)

b)

Fot. 5.11. Defektoskopy ultradźwiękowe firmy STARMANS:
a) defektoskop ultradźwiękowy DIO 1000, b) defektoskop ultradźwiękowy DIO 562 (fot. własne)

	Opis: Badanie połączenia spawanego na rurociągu Rudniańskich odpadów poflotacyjnych. Spaw do poprawy. Występują liczne pęcherze, nierówne lico, brak przetopu na całym obwodzie rury stalowej DN 1000 mm.

Fot. 5.12. Pomiar połączenia spawanego o średnicy DN 1000 mm metodą ultradźwiękową; dotyczy rurociągu stalowego magistralnego odpadów poflotacyjnych na trasie z Komory Rozrządu RG w kierunku OUOW Żelazny Most (fot. własne)

Opis:
Badanie połączenia spawanego na rurociągu Lubińskim, pospawanym w 2022 r.
Spaw do poprawy. Występują liczne pęcherze, nierówne lico, brak przetopu na całym obwodzie rury stalowej DN 800 mm.

Fot. 5.13.Pomiar połączenia spawanego o średnicy DN 800 mm metodą ultradźwiękową; pomiar dotyczy rurociągu stalowego magistralnego odpadów poflotacyjnych z trasy ZWR Lubin w kierunku Komory Rozrządu LG (fot. własne)

<table>
<tr><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td> </td><td>Opis:
Badanie połączenia spawanego na rurociągu Rudniańskich odpadów poflotacyjnych.
Spaw do poprawy. Występują liczne pęcherze, nierówne lico, brak przetopu na całym obwodzie rury stalowej DN 1000 mm.</td></tr>
</table>

Fot.5.14. Pomiar połączenia spawanego o średnicy DN 1000 mm metodą ultradźwiękową; dotyczy rurociągu stalowego magistralnego odpadów poflotacyjnych na trasie z węzła „H” w kierunku węzła „B” na OUOW Żelazny Most (fot. własne)

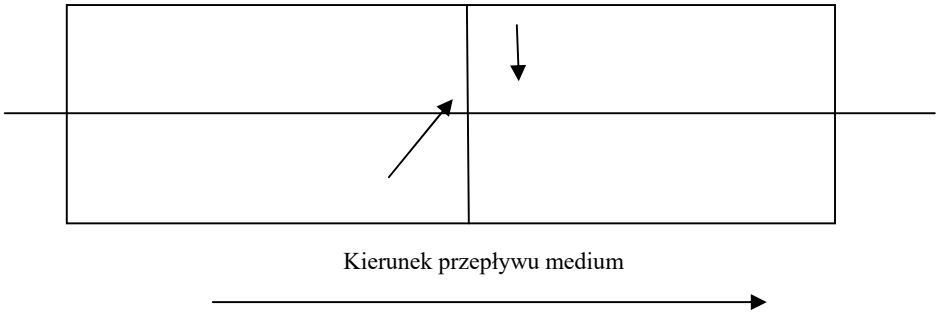
Tablica 5.2. Zestawienie pomiarów badań ultradźwiękowych pobranych próbek rury R1 i R2 z rejonu węzła H w kierunku węzła Z na OUOW Żelazny Most

Protokół badań ultradźwiękowych Nr 1 Str. 1							**Zakres badania 100 % metoda ultradźwiękową (UT) oznaczonych spoin**
Przedmiot badania: **Złącza spawane DN 1000 mm rurociągu odpadów poflotacyjnych R1 w rejonie pompowni H (rejon kompensatora stalowego K64) na OUOW Żelazny Most**							
Kryteria akceptacji wg: **PN-EN ISO 11666:2018-04** **poziom akceptacji 3** **Poziom jakości złączy spawanych wg:** **PN-EN ISO 5817:2023-08**		**Badano wg:** **PN-EN ISO 17640:2011 – POZIOM BADANIA A**		**Rodzaj złączy:** **V - spoina czołowa**			**Metoda spawania:** **111 – spawanie elektrodą otuloną**
Warunki badań ultradźwiękowych							
Metoda badania: **DGS**		Środek sprzęgający: **Coupling glue**		Wzorzec kalibracyjny **W1 & No.2**			Wzorzec odniesienia **With disc shaped reflektor (DSR)**
Aparat ultradźwiękowy: DIO 562, No.08/011 **Aparat ultradźwiękowy: DIO 1000**							
Parametry techniczne badania:		**Głowice**					
		$4T70^0$10X10C	**$4T70^0$15X15C**				
Częstotliwość	MHz	4	4				
Kąt głowicy	^{0}	70	70				
Wymiar przetwornika	mm	10x10	8x8				
Reflektor odniesienia	mm	D_{DSR}=1,0 mm	D_{DSR}=1,0 mm				
Wzmocnienie odniesienia	dB	58	57				
Wzmocnienie rejestracji	dB	D_{DSR}=1,0 mm	D_{DSR}=1,0 mm				
Straty przeniesienia	dB	2	2				
Wzmocnienie badania	dB	60	59				
Wynik badania		**X**	**Spełnia wymagania.** **Złącza spawane doczołowo DN 1000 mm, 12 szt. tj. nr: S1/N, S2/S, S3/N, S4/N, S5/S, S7/S, S10/S, S11/N, S12/N, S13/N, S15/S, S16/N**				
		X	**<u>Nie spełnia wymagań</u>.** **PN-EN ISO 6520-1:2009 -402-Brak przetopu. Złącza spawane doczołowe DN 1000 mm, 5 szt., tj. nr: S6/S, S8/S, S9/S, S14/S, S17/S**				

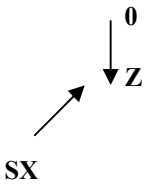
Str. 2	**Protokół badań ultradźwiękowych Nr 1**

Opis:
Złącza spawane o średnicy DN 1000 mm rurociągu stalowego w rejonie pompowni węzła „H", przygotowane do wymiany, na OUOW Żelazny Most. Badania wykonano minimum 48 godzin po zakończeniu procesu spawania.
Plan badań i rozmieszczenie spoin od str. 5 do str. 9
Numeracja złączy spawanych oznaczona na rurociągu w sposób trwały.
Złącze spawane DN 1000 mm – badane 17 szt.

Szkic:



Legenda:



OZ, SX – kierunek badania spoiny

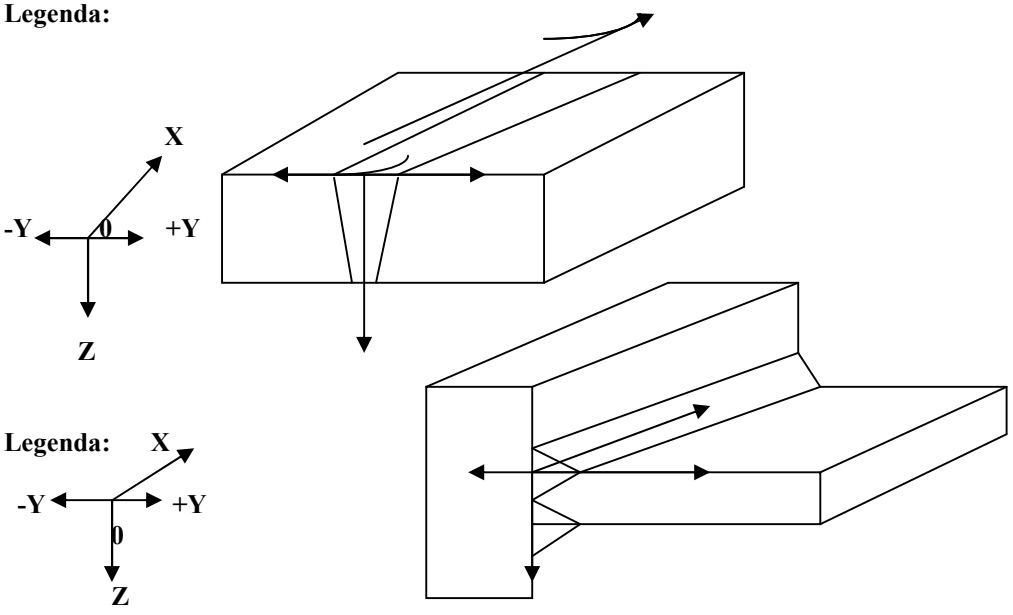
Str. 3	**Protokół badań ultradźwiękowych Nr 1**

Wyniki badań ultradźwiękowych - część 1

Spoina		**S1/ N**	**S2/ S**	**S3/ N**	**S4/ N**	**S5/ S**	**S6/ S**	**S7/ S**	**S8/ S**	**S9 /S**	**S10/ N**	**S11/ N**	**S12/ N**
Niezgodność nr		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Położenie wskazania w kierunku wzdłużnym (x) [mm]		-	-	-	-	-	0	-	0	0	-	-	-
Położenie wskazania w kierunku poprzecznym (y) [mm]		-	-	-	-	-	0	-	0	0	-	-	-
Położenie wskazania w kierunku głębokości (z) [mm]		-	-	-	-	-	12	-	12	12	-	-	-
Długość niezgodności (l) [mm]		-	-	-	-	-	1490	-	1560	1400	-	-	-
Amplituda echa do DGS [dB]		-	-	-	-	-	+4	-	+6	+10	-	-	-
	Dopuszczalny	**V**	**V**	**V**	**V**	**V**		**V**			**V**	**V**	**V**
Ocena	Odrzucony						**V**		**V**	**V**			
	Poprawiony												

Szkic:

Legenda:



Legenda:

gdzie:
Z, -Y, +Y, X – kierunek badania spoiny, Z – położenie wskazania w kierunku głębokości, Y – położenie wskazania w kierunku poprzecznym (-,+ z prawej strony, z lewej strony danej spoiny), X – położenie wskazania w kierunku wzdłużnym, O – początek pomiaru

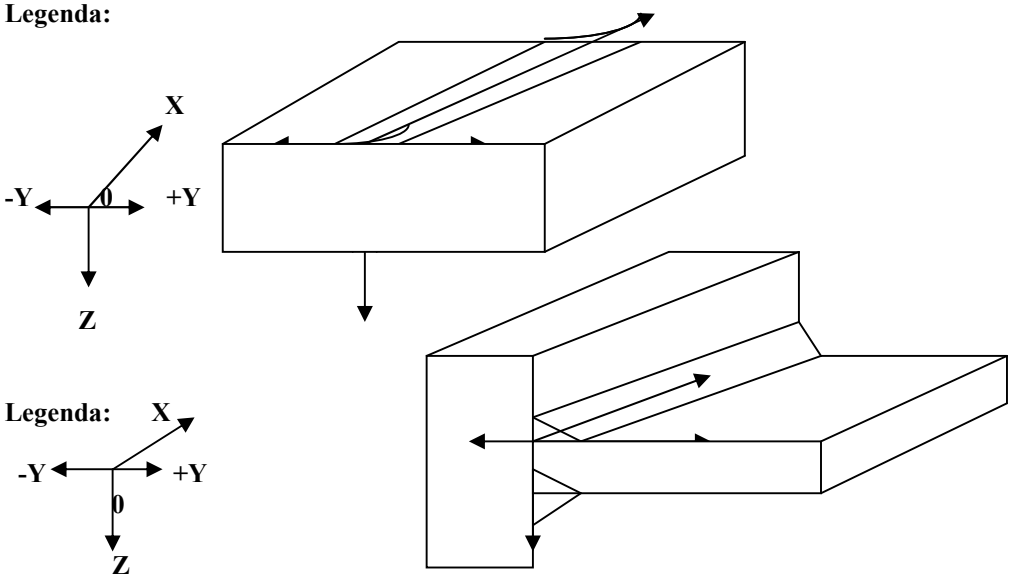
Str. 4	**Protokół badań ultradźwiękowych Nr 1**

Wyniki badań ultradźwiękowych – część 2

Spoina		S13/ N	S14/ S	S15/ S	S16/ N	S17/ S							
Niezgodność nr		13	14	15	16	17							
Położenie wskazania w kierunku wzdłużnym (x) [mm]		-	0	-	-	0							
Położenie wskazania w kierunku poprzecznym (y) [mm]		-	0	-	-	0							
Położenie wskazania w kierunku głębokości (z) [mm]		-	12	-	-	11							
Długość niezgodności (l) [mm]		-	1600	-	-	600							
Amplituda echa do DGS [dB]		-	+6	-	-	+8							
	Dopuszczalny	V		V	V								
Ocena	Odrzucony		V			V							
	Poprawiony												

Szkic:

Legenda:



Legenda:

gdzie:
Z, -Y, +Y, X – kierunek badania spoiny, Z – położenie wskazania w kierunku głębokości, Y – położenie wskazania w kierunku poprzecznym (-,+ z prawej strony, z lewej strony danej spoiny), X – położenie wskazania w kierunku wzdłużnym, O – początek pomiaru

Str. 5	**Protokół badań ultradźwiękowych Nr 1**

Opis.

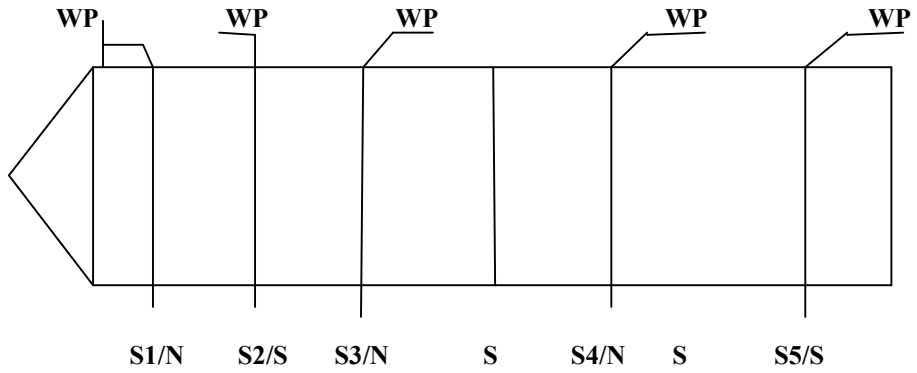
Lokalizacja badań spoin:

Złącza spawane o średnicy DN 1000 mm rurociągu stalowego w rejonie pompowni węzła „H", przygotowane do wymiany, na OUOW Żelazny Most. Badania wykonano minimum 48 godzin po zakończeniu procesu spawania.

Plan badań i rozmieszczenie spoin – na poniższym rysunku.

Numeracja złączy spawanych oznaczona na rurociągu w sposób trwały.

Złącze spawane DN 1000 mm – badane 5 szt. opisane jako S1/N, S2/S, S3/N, S4/N, S5/S



Legenda:

WP – WYNIK POZYTYWNY BADANIA ULTRADŹWIĘKOWEGO ZŁĄCZA SPAWANEGO
S1/N, S3/N, S4/N – ZŁĄCZA SPAWANE NOWE BADANE ULTRADŹWIĘKOWO
S2/S, S5/S – ZŁĄCZA SPAWANE STARE BADANE ULTRADŹWIĘKOWO
S – POZOSTAŁE ZŁĄCZA SPAWANE (NIE BADANE ULTRADŹWIĘKOWO)

Str. 6	**Protokół badań ultradźwiękowych Nr 1**

Opis.

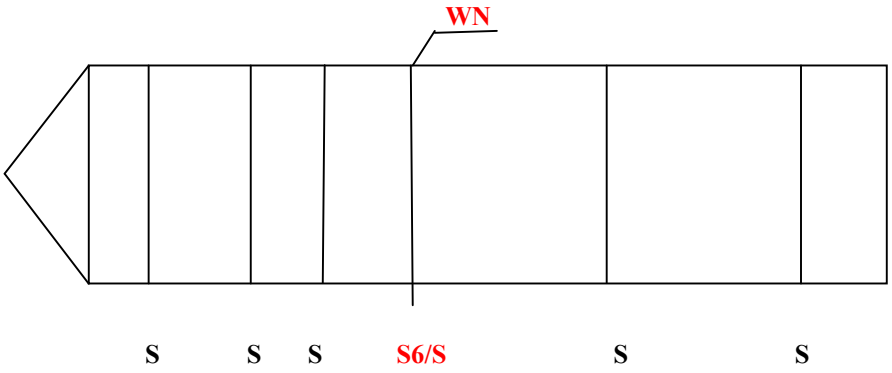
Lokalizacja badań spoin:

Złącza spawane o średnicy DN 1000mm rurociągu stalowego w rejonie pompowni węzła „H", przygotowane do wymiany, na OUOW Żelazny Most. Badania wykonano minimum 48 godzin po zakończeniu procesu spawania.

Plan badań i rozmieszczenie spoin – na poniższym rysunku.

Numeracja złączy spawanych oznaczona na rurociągu w sposób trwały.

Złącze spawane DN 1000 mm – badana 1 szt.; opisane jako S6/S



Legenda:

WN – WYNIK NEGATYWNY BADANIA ULTRADŹWIĘKOWEGO ZŁĄCZA SPAWANEGO
S6/S – ZŁĄCZA SPAWANE STARE BADANE ULTRADŹWIĘKOWO
S – POZOSTAŁE ZŁĄCZA SPAWANE (NIE BADANE ULTRADŹWIĘKOWO)

Str. 7	**Protokół badań ultradźwiękowych Nr 1**

Opis.

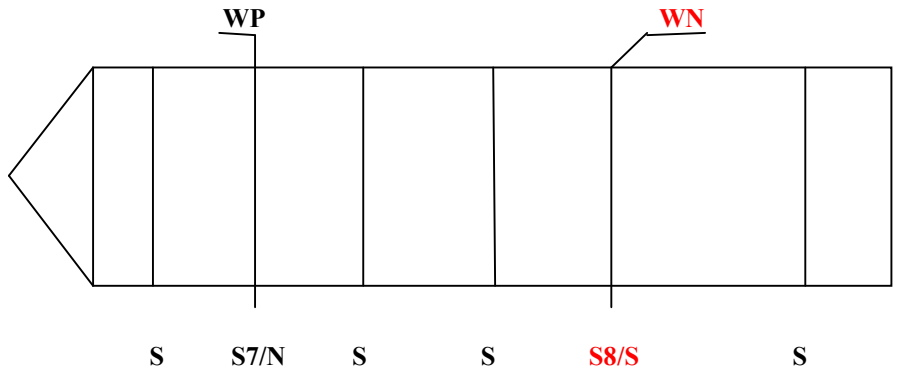
Lokalizacja badań spoin:

Złącza spawane o średnicy DN 1000mm rurociągu stalowego w rejonie pompowni węzła „H", przygotowane do wymiany, na OUOW Żelazny Most. Badania wykonano minimum 48 godzin po zakończeniu procesu spawania.

Plan badań i rozmieszczenie spoin – na poniższym rysunku.

Numeracja złączy spawanych oznaczona na rurociągu w sposób trwały.

Złącze spawane DN 1000 mm – badane 2 szt. opisane jako S7/N, S8/S



Legenda:

WP – WYNIK POZYTYWNY BADANIA ULTRADŹWIĘKOWEGO ZŁĄCZA SPAWANEGO

WN – WYNIK NEGATYWNY BADANIA ULTRADŹWIĘKOWEGO ZŁĄCZA SPAWANEGO

S7/N – ZŁĄCZA SPAWANE NOWE BADANE ULTRADŹWIĘKOWO

S8/S – ZŁĄCZA SPAWANE STARE BADANE ULTRADŹWIĘKOWO

S – POZOSTAŁE ZŁĄCZA SPAWANE (NIE BADANE ULTRADŹWIĘKOWO)

Str. 8	**Protokół badań ultradźwiękowych Nr 1**

Opis.

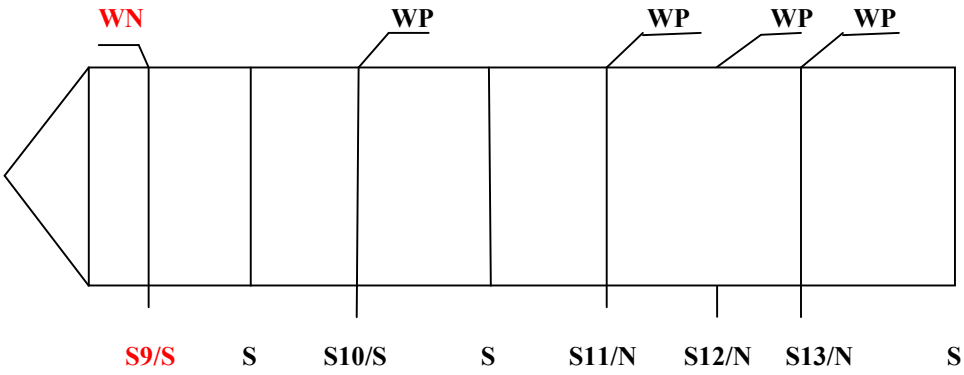
Lokalizacja badań spoin:

Złącza spawane o średnicy DN 1000mm rurociągu stalowego w rejonie pompowni węzła „H", przygotowane do wymiany, na OUOW Żelazny Most. Badania wykonano minimum 48 godzin po zakończeniu procesu spawania.

Plan badań i rozmieszczenie spoin – na poniższym rysunku.

Numeracja złączy spawanych oznaczona na rurociągu w sposób trwały.

Złącze spawane DN 1000 mm – badane 5 szt. opisane jako S9/S, S10/S, S11/N, S12/N, S13/N



Legenda:

WN – WYNIK NEGATYWNY BADANIA ULTRADŹWIĘKOWEGO ZŁĄCZA SPAWANEGO

WP – WYNIK POZYTYWNY BADANIA ULTRADŹWIĘKOWEGO ZŁĄCZA SPAWANEGO

S11/N, S12/N, S13/N – ZŁĄCZA SPAWANE NOWE BADANE ULTRADŹWIĘKOWO

S9/S, S10/S – ZŁĄCZA SPAWANE STARE BADANE ULTRADŹWIĘKOWO

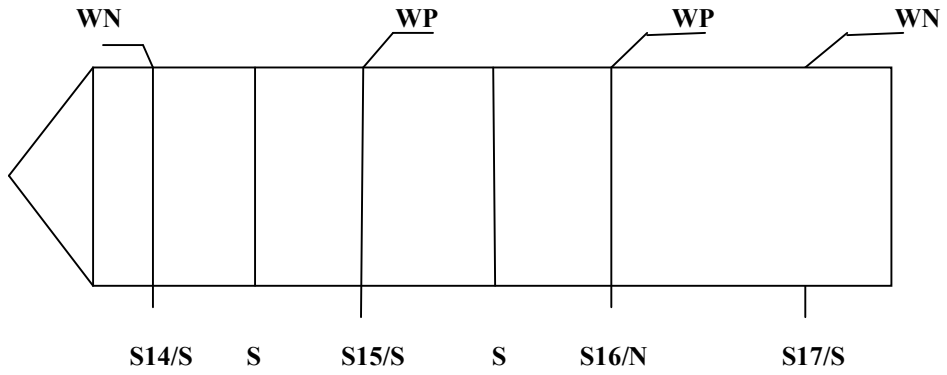
S – POZOSTAŁE ZŁĄCZA SPAWANE (NIE BADANE ULTRADŹWIĘKOWO)

Str. 9	**Protokół badań ultradźwiękowych Nr 1**

Opis.

Lokalizacja badań spoin:

Rurociąg stalowy o średnicy DN 1000 mm odpadów poflotacyjnych w rejonie pompowni węzła „H", przygotowane do wymiany rurociąg, który uległ awarii na OUOW Żelazny Most. Badania wykonano minimum 48 godzin po zakończeniu procesu spawania.
Plan badań i rozmieszczenie spoin – na poniższym rysunku
Numeracja złączy spawanych oznaczona na rurociągu w sposób trwały.
Złącze spawane DN 1000 mm – badane 4 szt. opisane jako S14/S, S15/S, S16/N, S17/S



Legenda:

WN – WYNIK NEGATYWNY BADANIA ULTRADŹWIĘKOWEGO ZŁĄCZA SPAWANEGO
WP – WYNIK POZYTYWNY BADANIA ULTRADŹWIĘKOWEGO ZŁĄCZA SPAWANEGO
S16/N – ZŁĄCZA SPAWANE NOWE BADANE ULTRADŹWIĘKOWO
S14/S, S15/S, S17/S – ZŁĄCZA SPAWANE STARE BADANE ULTRADŹWIĘKOWO
S – POZOSTAŁE ZŁĄCZA SPAWANE (NIE BADANE ULTRADŹWIĘKOWO)

Str. 1 **Protokół badań ultradźwiękowych Nr 2**			**Zakres badania 100 % UT oznaczonych spoin**
Przedmiot badania: **Złącza spawane DN 1000 mm rurociągu odpadów poflotacyjnych R2 w rejonie kompensatora stalowego K36 w kierunku kompensatora stalowego K38 na OUOW Żelazny Most**			
Kryteria akceptacji wg: **PN-EN ISO 11666:2018-04-poziom akceptacji 3** **Poziom jakości złączy spawanych C wg:** **PN-EN ISO 5817:2023-08**	**Badano wg:** **PN-EN ISO 17640:2011 – POZIOM BADANIA A**	**Rodzaj złączy:** **V - spoina czołowa**	**Metoda spawania:** **111 – spawanie elektrodą otuloną**

Warunki badań ultradźwiękowych

Metoda badania: **DGS**	Środek sprzęgający: **Coupling glue**	Wzorzec kalibracyjny **W1 & No.2**	Wzorzec odniesienia **With disc shaped reflektor (DSR)**

Aparat ultradźwiękowy: DIO 562, No.08/011

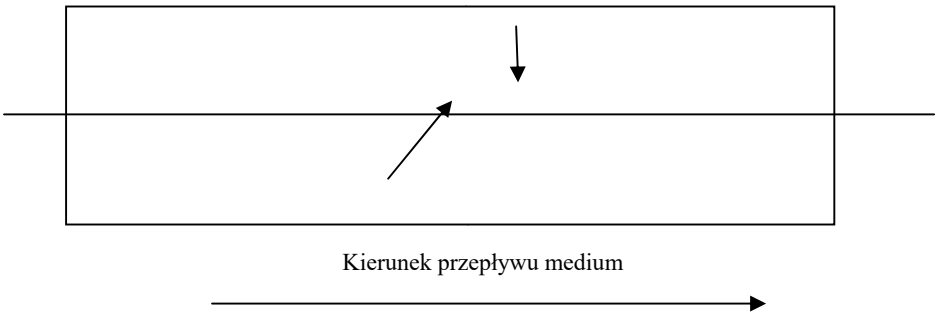
Aparat ultradźwiękowy: DIO 1000

Parametry techniczne badania:		**Głowice**					
		4T70^{0}10X10C	**4T70^{0}15X15C**				
Częstotliwość	MHz	4	4				
Kąt głowicy	^{0}	70	70				
Wymiar przetwornika	mm	10x10	8x8				
Reflektor odniesienia	mm	D_{DSR}=1,0 mm	D_{DSR}=1,0 mm				
Wzmocnienie odniesienia	dB	58	57				
Wzmocnienie rejestracji	dB	D_{DSR}=1,0 mm	D_{DSR}=1,0 mm				
Straty przeniesienia	dB	2	2				
Wzmocnienie badania	dB	60	59				
Wynik badania		**X**	~~**Spełnia wymagania.**~~				
		X	**Nie spełnia wymagań.** **PN-EN ISO 6520-1:2009 -402-Brak przetopu. Złącza spawane doczołowe DN 1000 mm, 1 szt. nr S3**				

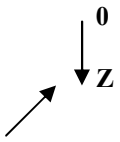
Str. 2	**Protokół badań ultradźwiękowych Nr 2**

Opis:
Złącza spawane o średnicy DN 1000 mm rurociągu stalowego R2 w rejonie kompensatora stalowego od K36 do K38, przygotowane do wymiany, na OUOW Żelazny Most. Badania wykonano minimum 48 godzin po zakończeniu procesu spawania.
Plan badań i rozmieszczenie spoin – zaznaczono na str. 4
Numeracja złączy spawanych oznaczona na rurociągu w sposób trwały.
Złącze spawane DN 1000 mm; 1 szt., Spawanie doczołowe.

Szkic:



Legenda:



OZ, SX – kierunek badania spoiny

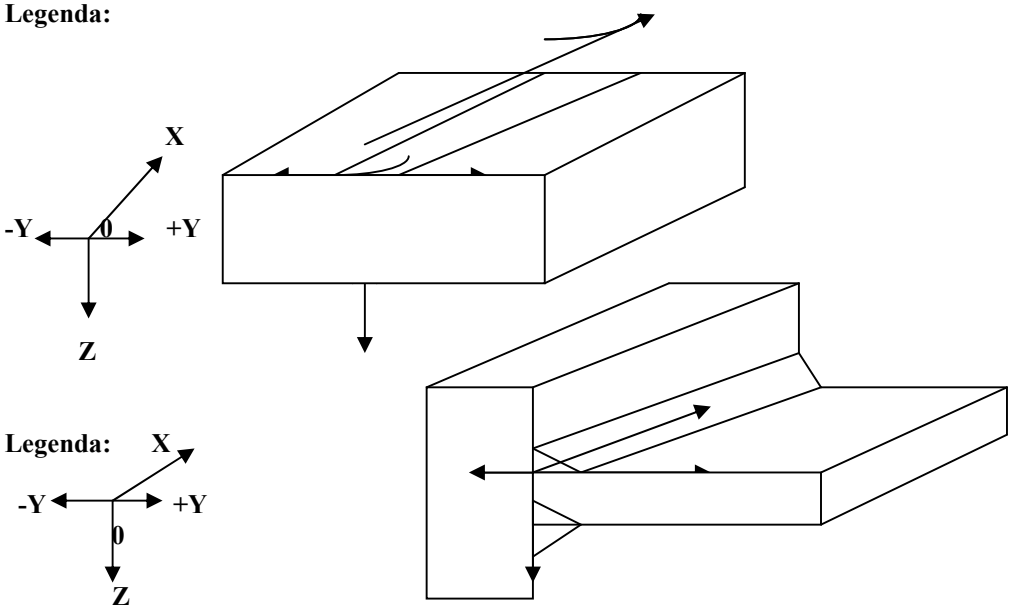
Str. 3	**Protokół badań ultradźwiękowych Nr 2**

Wyniki badań ultradźwiękowych

Spoina		**S3**											
Niezgodność nr		1											
Położenie wskazania w kierunku wzdłużnym (x) [mm]		0											
Położenie wskazania w kierunku poprzecznym (y) [mm]		0											
Położenie wskazania w kierunku głębokości (z) [mm]		15											
Długość niezgodności (l) [mm]		1600											
Amplituda echa do DGS [dB]		+12											
	Dopuszczalny												
Ocena	Odrzucony	**V**											
	Poprawiony												

Szkic:

Legenda:

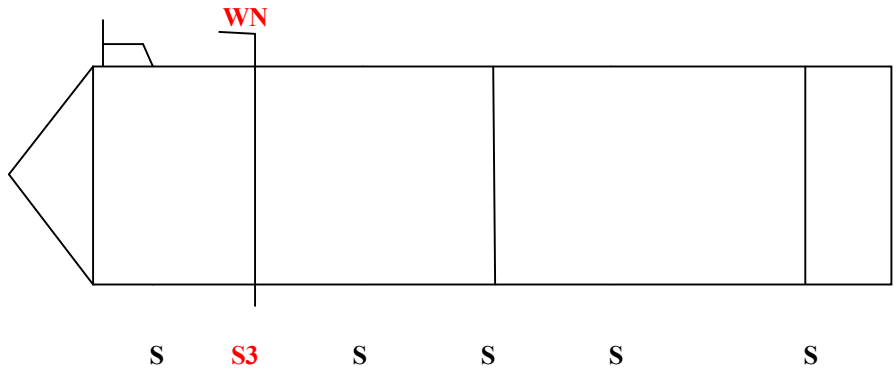


Legenda:

gdzie:
Z, -Y, +Y, X – kierunek badania spoiny, Z – położenie wskazania w kierunku głębokości, Y – położenie wskazania w kierunku poprzecznym (-,+ z prawej strony, z lewej strony danej spoiny), X – położenie wskazania w kierunku wzdłużnym, O – początek pomiaru

Str. 4	**Protokół badań ultradźwiękowych Nr 2**

Opis.
Lokalizacja badań spoin:
Złącza spawane o średnicy DN 1000 mm rurociągu stalowego R2 w rejonie kompensatora stalowego od K36 do K38, przygotowane do wymiany, na OUOW Żelazny Most. Badania wykonano minimum 48 godzin po zakończeniu procesu spawania.
Plan badań i rozmieszczenie spoin – na poniższym rysunku.
Numeracja złączy spawanych oznaczona na rurociągu w sposób trwały.
Złącze spawane DN 1000 mm – badana1 szt. opisane S3



Legenda:
WN – WYNIK NEGATYWNY BADANIA ULTRADŹWIĘKOWEGO ZŁĄCZA SPAWANEGO
S3 – ZŁĄCZA SPAWANE BADANE ULTRADŹWIĘKOWO
S – POZOSTAŁE ZŁĄCZA SPAWANE (NIE BADANE ULTRADŹWIĘKOWO)

Podsumowując wszystkie przeprowadzone badania dla rurociągów, które uległy awariom, można stwierdzić, że podstawową rzeczą, aby uniknąć w przyszłości stanów awaryjnych i częstych napraw jest właściwie przeprowadzona kontrola i odbiór robót spawalniczych, która powinna odbywać się z uwzględnieniem następujących zasad:

- należy oceniać jakość złączy z wykorzystaniem klasy konstrukcji spawanych i zgrzewanych (PN-87/M-69008 Spawalnictwo. Klasyfikacja konstrukcji spawanych),
- należy stosować następujące normy:

PN-EN 970:1997 Spawalnictwo. Badania nieniszczące złączy spawanych. Badania wizualne

PN-EN ISO 5817: 2009 Spawalnictwo. Złącza spawane ze stali, niklu, tytanu i ich stopów (z wyjątkiem spawanych wiązką). Poziomy jakości według niezgodności spawalniczych

PN-EN ISO 6520-1: 2009 Klasyfikacja niezgodności spawalniczych w złączach spawanych metali wraz z objaśnieniami

PN-EN ISO 5817:2009 Standard jakości w spawalnictwie

– przestrzegania zasad bezpiecznej pracy na stanowisku: kontroli złącz spawanych,

– rozróżniania i stosowania różnych metod badań połączeń spawanych; stosowanie następujących norm:

PN-EN 1330-1:2001 Badania nieniszczące. Terminologia. Terminy ogólne

PN-EN 970:1999 oraz PN-EN 970:1999/Ap1:2003 Spawalnictwo. Badania nieniszczące złączy spawanych. Badania wizualne

PN-EN 571-1:1999 Badania nieniszczące. Badania penetracyjne. Zasady ogólne

PN-EN 1290:2000 Badania nieniszczące złączy spawanych. Badania magnetyczno-proszkowe złączy spawanych

PN-EN 1330-5:2001 Badania nieniszczące. Terminologia. Część 5. Terminy stosowane w badaniach metodą prądów wirowych

PN-EN 1330-4:2001 Badania nieniszczące. Terminologia. Część 4. Terminy stosowane w badaniach ultradźwiękowych

PN-EN 1330-3:1999 Badania nieniszczące. Terminologia. Część 3. Terminy stosowane w radiograficznych badaniach przemysłowych

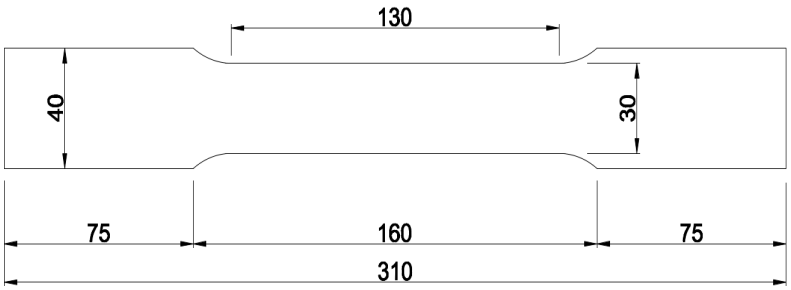
– prawidłowego odczytywania rysunków technicznych konstrukcji spawanych (por. PN-EN ISO 4063:2009 Spawanie i procesy pokrewne. Nazwy i numery procesów; PN-89/M-01134 Rysunek techniczny maszynowy. Uproszczenia rysunkowe)

– wykrywania niezgodności spawalniczych za pomocą dostępnych metod i narzędzi (PN-EN ISO 8517:2023-08 Welding. Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded). Quality levels for imperfections, PN-EN ISO 6520-1:2009 Spawanie i procesy pokrewne. Klasyfikacja geometrycznych niezgodności spawalniczych w metalach. Część 1: Spawanie), np. za pomocą pomiarowego przyrządu spawalniczego Unispa S, spoinomierza uniwersalnego, luksomierza, lupy, suwmiarki, liniału, itp.

5.3. Badania wytrzymałościowe

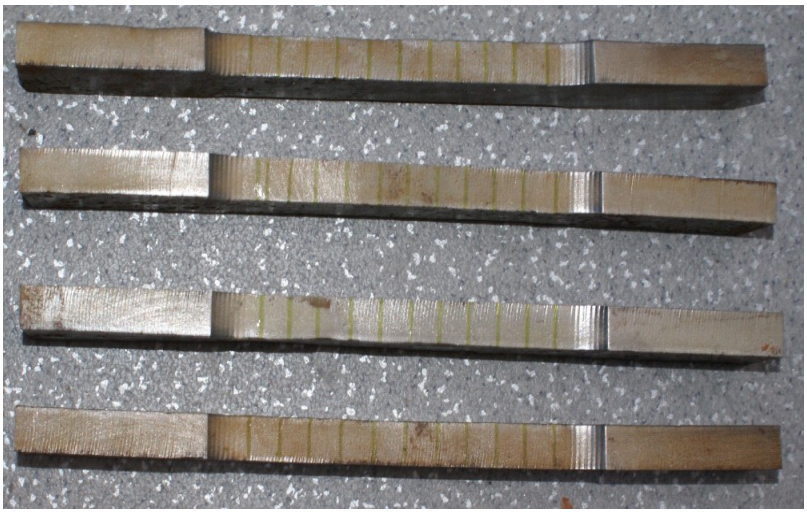
Wybrane wyniki badań wytrzymałościowych zostały opublikowane w pracach Duszyńskiej i in. (2023, 2024a, 2024b). Próbki do badań wytrzymałościowych wycięto z rurociągu stalowego DN 1000 mm, o pierwotnej grubości 16 mm, który uległ awarii (Fot. 5.15). Materiał wycięto w kierunku podłużnym rury. Do badań wykorzystano próbki o nominalnych wymiarach, jak pokazano na rysunku 5.1. Do badania wybrano miejsca z równomiernie osadzoną korozją powierzchniową, wycinając najpierw i odrzucając strefę zniszczoną pośrodku blachy. Próbki wycięto przy użyciu plotera wodnego. Wymiar próbki wynikał z pierwotnego zamiaru zeszlifowania jej do grubości 14 mm. Przyjęto typowy kształt próbki dla tej grubości materiału.

Fot. 5.15. Fragment materiału pobranego z rurociągu stalowego DN 1000 mm, z którego wycięto próbki do badań wytrzymałościowych (fot. własne)

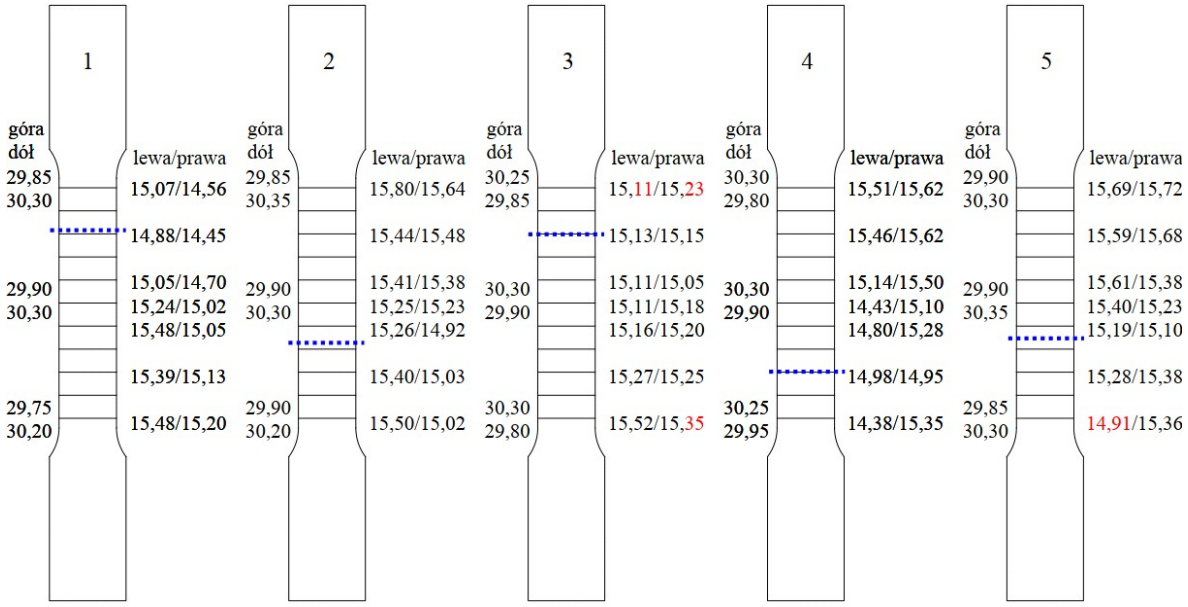


Rys. 5.1. Wymiary próbki w milimetrach

Badania wytrzymałościowe wykonano w Laboratorium Budownictwa Politechniki Śląskiej. Materiał do badań oczyszczono szczotką szlifierską, a następnie przetarto papierem ściernym. Wymiary przekrojów próbek przedstawiono na rysunku 5.2. Należy dodać, że zróżnicowanie szerokości próbek o około 0,4 mm po ich dwóch stronach wynika z odprężenia materiału po cięciu.



Fot. 5.16. Widok przygotowanych próbek do badań wytrzymałościowych (fot. własna)



Rys. 5.2. Wymiary przekrojów poszczególnych próbek w milimetrach. Linią przerywaną zaznaczono miejsca szyjkowania

W celu wykonania pomiarów za pomocą systemu Aramis, próbki zostały pokryte po jednej stronie deseniem, wykonanym farbą w sprayu. Dla ułatwienia orientacji wykonano także oznaczenia markerem w postaci poziomych pasków (Fot. 5.16÷5.17). Dokonano pomiaru ekstensometrem optycznym w całym zakresie obciążenia.

Próbę rozciągania przeprowadzono na zmodernizowanej maszynie ZD-100 Labor-Tech o zakresie pomiarowym 1000 kN. Prędkość początkowa rozciągania wynosiła 10 MPa/s (była zwiększana automatycznie do 30 MPa/s, aż do wartości naprężenia ok.

140 MPa); po uplastycznieniu 5 mm/min (stopniowo wzrastając do wartości ok. 20 mm/min). Z uwagi na fakt, że program sterujący maszyną wytrzymałościową wyłącza ją automatycznie po odnotowaniu szybkiego spadku ciśnienia, w związku z tym rozerwanie szyjki uzyskano w przypadku dwóch próbek (próbka nr 1 i nr 2).

Postać zniszczenia próbek była wyraźnie ciągliwa, ze znacznym wydłużeniem i przewężeniem oraz z całkowicie lub częściowo ukośnymi powierzchniami przełomów (na próbce nr 2 jedno ścięcie ukośne, w przełomie próbki nr 1 widoczne jest kilka powierzchni, prawdopodobnie ścinanych po kolei, co uwidoczniło się w odczytach pod sam koniec badania). Widok ogólny próbek po badaniu i zbliżenia na miejsca przełomów przedstawiono na fotografii 5.17.

Próbki od lewej: nr 5, nr 4, nr 3, nr 2, nr 1

Próbki od dołu: nr 1, nr 2, nr 3

Próbka nr 1

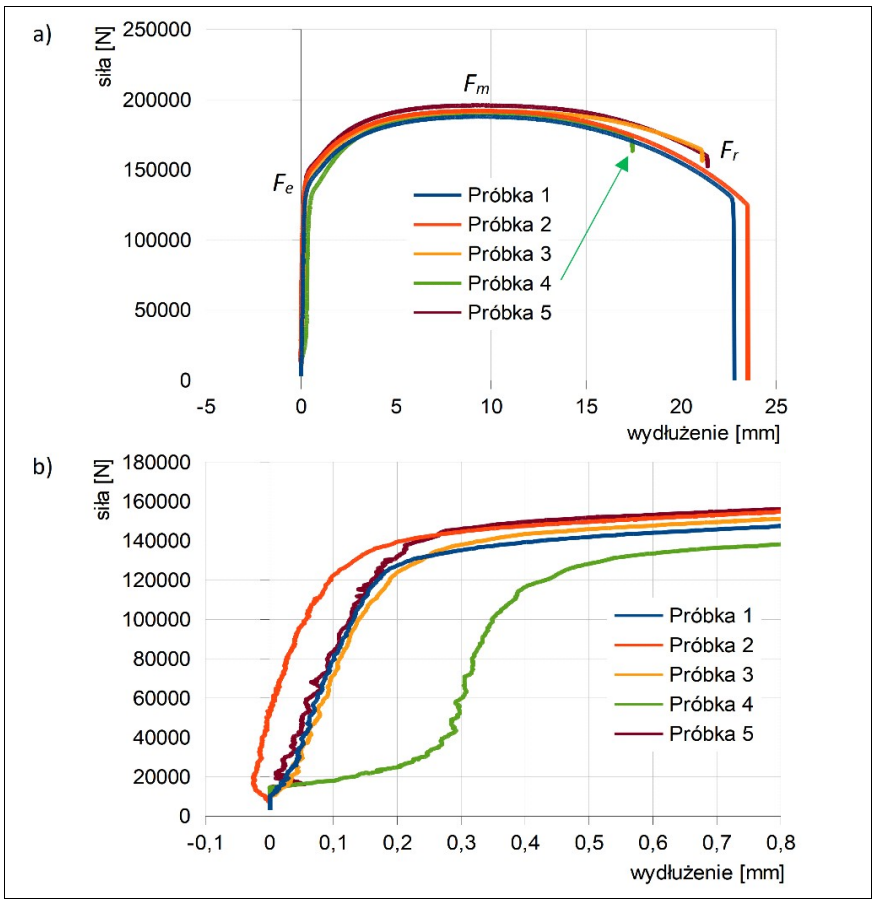
Próbka nr 1

Próbka nr 2

Fot. 5.17. Widok próbek po badaniu (fot. własne)

Wykresy uzyskane z pomiaru ekstensometrem optycznym przedstawiono na rysunku 5.3. Maksymalne wartości sił rozciągających F_m, wytrzymałości materiału na rozciąganie R_m odniesionej do przekroju początkowego próbki A_0 w miejscu rozerwania oraz

w najwęższym miejscu szyjki, jak również określonego manualnie wydłużenia względnego próbki na długości pomiarowej (lub długości zastępczej dla próbek rozerwanych poza 1/3 środkowej części długości pomiarowej) oraz przewężenia zestawiono w Tablicy 5.3. Dane uzupełniono o wartości wydłużenia procentowego z pomiaru ekstensometrem optycznym o bazie pomiarowej 110 mm.

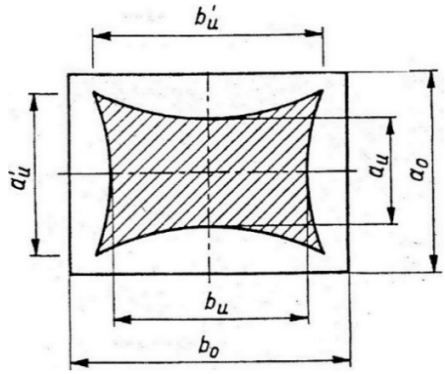


Rys. 5.3. Zależność „siła-wydłużenie" (bez korekty), otrzymana z badania próbek ekstensometrem optycznym o bazie 110 mm, a) cały zakres pomiarowy, b) zakres do 0,8 mm wydłużenia; na wykresie orientacyjnie zaznaczono moment uzyskania sił F_e, F_m *i* F_r

Zestawienie obliczonych końcowych wydłużeń i przewężeń zestawiono w Tablicy 5.3, przy czym w przypadku próbek o numerach 3, 4 i 5 ocena ciągliwości jest nieco zaniżona, gdyż szyjka nie uległa rozerwaniu.

Pole przewężone po badaniu obliczono zgodnie ze wzorem podanym w normie PN-H-04310:1991 (por. Rys. 5.4):

$$S_u = A_u = 0{,}25(b_u + b_u')(a_u + a_u') \tag{5.1}$$



Rys. 5.4. Wymiary pierwotne i przewężonego przekroju

Tablica 5.3. Maksymalne wartości siły rozciągającej F_m, pola początkowego A_0 przekroju w pobliżu miejsc szyjkowania oraz wartości wytrzymałości na rozciąganie R_m odniesione do przekroju początkowego próbki oraz wydłużenia i przewężenia

Numer próbki	Max. wartość siły rozciągającej F_m [kN]	Początkowe pole przekroju próbki A_0 [1)] [mm^2]	Wytrzymałość na rozciąganie R_m [MPa]	Wydłużenie [%]			Przewężenie [%]
				Po zerwaniu (pomiar mikrometrem)	Ekstensometr optyczny		$(A_0-A_u)/A_0$ (pomiar manualny)
					Max. [4)]	dla siły F_m	
Próbka 1	187,84	441	425,9	28,8 [3)]	20,7	8,71	66,3
Próbka 2	192,08	454	423,1	20,0 (23,8 [3)])	21,4	8,57	67,8
Próbka 3	191,80	455	421,5	-	*19,2* [2)]	8,91	*46,0* [2)]
Próbka 4	190,38	450	423,1	-	*15,9* [2)]	8,37	*39,9* [2)]
Próbka 5	195,96	456	429,7	-	*19,5* [2)]	8,24	*49,1* [2)]
Średnia wartość	-	-	**424,7**	-	19,3 (20,2 [5)])	**8,56**	-

Objaśnienia:
A_u – końcowa pole przekroju próbki po badaniu [mm^2]
[1)] wartość początkowa w miejscu, w którym wystąpiło największe zwężenie próbki
[2)] próbka niezerwana
[3)] zastosowano zastępczą długość pomiarową do ustalenia wydłużenia ze względu na położenie szyjki
[4)] ostatni pomiar (próbki nr 3, nr 4 i nr 5) albo ostatni pomiar przed zerwaniem (próbki nr 1 i nr 2)
[5)] po odrzuceniu wartości 15,9%

Wartość średnia wytrzymałości na rozciąganie odniesiona do przekroju początkowego A_0 wyniosła $R_{m,śr}$ = 424,7 MPa, zaś odchylenie standardowe 3,25 MPa, a wskaźnik zmienności 0,765%.

Wartość charakterystyczna wytrzymałości na rozciąganie wyznaczona dla pięciu próbek według załącznika D do normy PN-EN 1990:2004, przy założeniu współczynnika konwersji równego 1, wynosi: $R_{m,k}$ = 424,7·(1-1,80·0,00765) = 419 MPa.

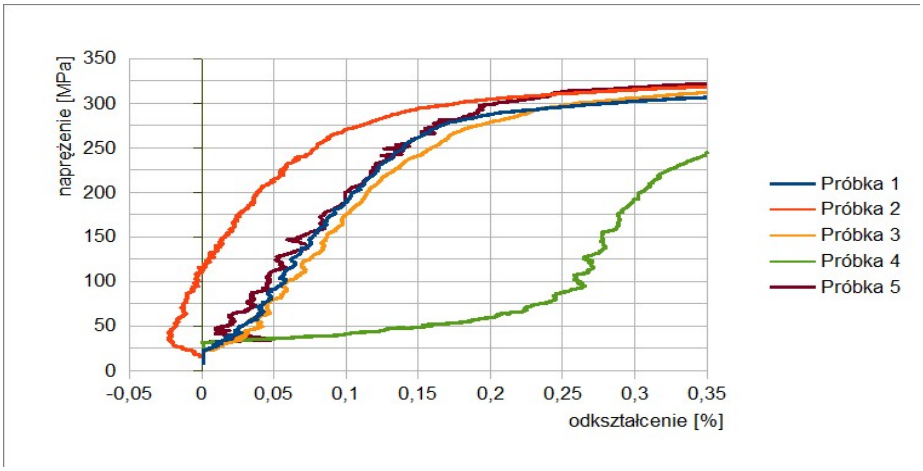
Wartość obliczeniowa wytrzymałości na rozciąganie według załącznika D do normy PN-EN 1990:2004 wynosi $R_{m,d}$ = 424,7·(1-3,37·0,00765) = 414 MPa.

Wartość charakterystyczna wytrzymałości na rozciąganie $R_{m,k}$ ma zastosowanie w przypadkach, takich jak ocena nośności przekroju osłabionego; według normy PN-EN 1993-1-1:2006 stosuje się $f_u \approx R_{m,k}$.

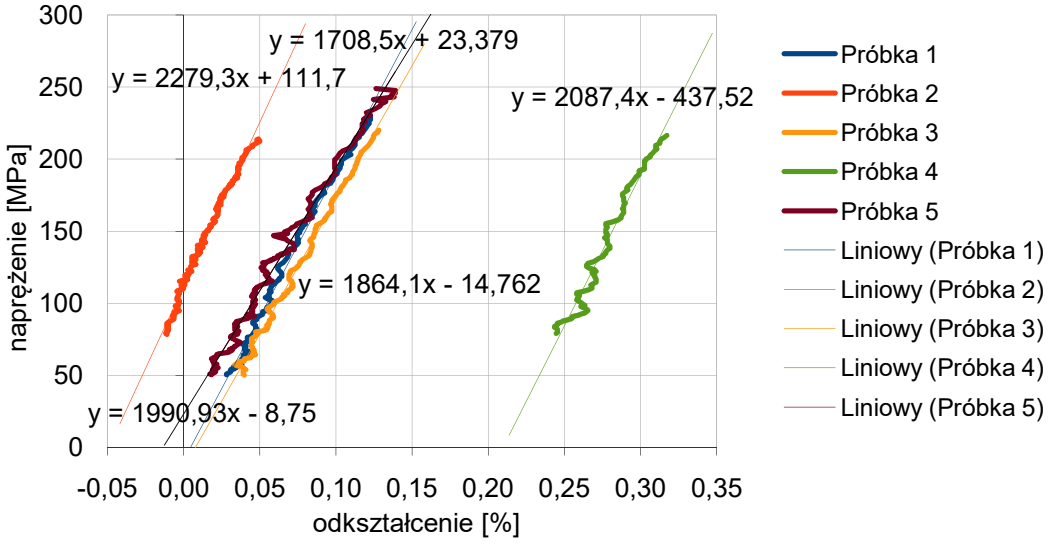
Podane wartości wytrzymałości na rozciąganie $R_{m,k}$ i $R_{m,d}$ mogą mieć też zastosowane w analizie naukowej przy wprowadzaniu dokładniejszego niż sprężysto-idealnie plastyczny modelu materiałowego, albo do oceny przydatności stali w konstrukcji obliczanej z uwzględnieniem rezerwy plastycznej.

Pomiar za pomocą ekstensometru optycznego nie zawsze umożliwia uzyskanie w pełni zadowalających rezultatów. Na podstawie badań ekstensometrem optycznym uzyskano zależności „siła – wydłużenie" dla próbek nr 2 i nr 4, które można uznać za nie w pełni prawidłowe (por. Rys. 5.3 i Rys. 5.5). Na rysunku 5.5 przedstawiono wykresy procentowych wydłużeń, określone przy założeniu długości ekstensometru równej 110 mm. Program sterujący automatycznie przyjmuje taką długość po zadaniu wymiaru przekroju próbki 15x30 mm. Początek pomiaru ekstensometrem optycznym automatycznie był ustawiony na siłę 3000 N.

Wartości modułu Younga wyznaczono stosując prostą regresji w zakresie naprężeń od 80 do 220 MPa, ustalonych dla średnich wartości pola przekroju na długości pomiarowej $A_{0,śr}$, w którym dla wszystkich próbek wykres zależności „naprężenie – odkształcenie" charakteryzuje się liniowym przebiegiem (por. Rys. 5.6). Zdecydowano się na odstępstwo od ogólnej wskazówki normy dotyczącej przyjmowania wartości z zakresu od 10 do 90% spodziewanej granicy plastyczności, podobnie jak postąpiono w przeszłości z ekstensometrem mechanicznym, przyjmując zakresy interpretacji w zakresie od ok. 20 do 80% spodziewanej granicy plastyczności. W kolejnym kroku sprawdzono zakresy naprężeń dla próbek nr 1, nr 3 i nr 5, uzyskując podobne rezultaty i przyjmując je za ostateczne.



Rys. 5.5. Wykres zależności „naprężenie – odkształcenie” (bez korekty) dla badanych próbek



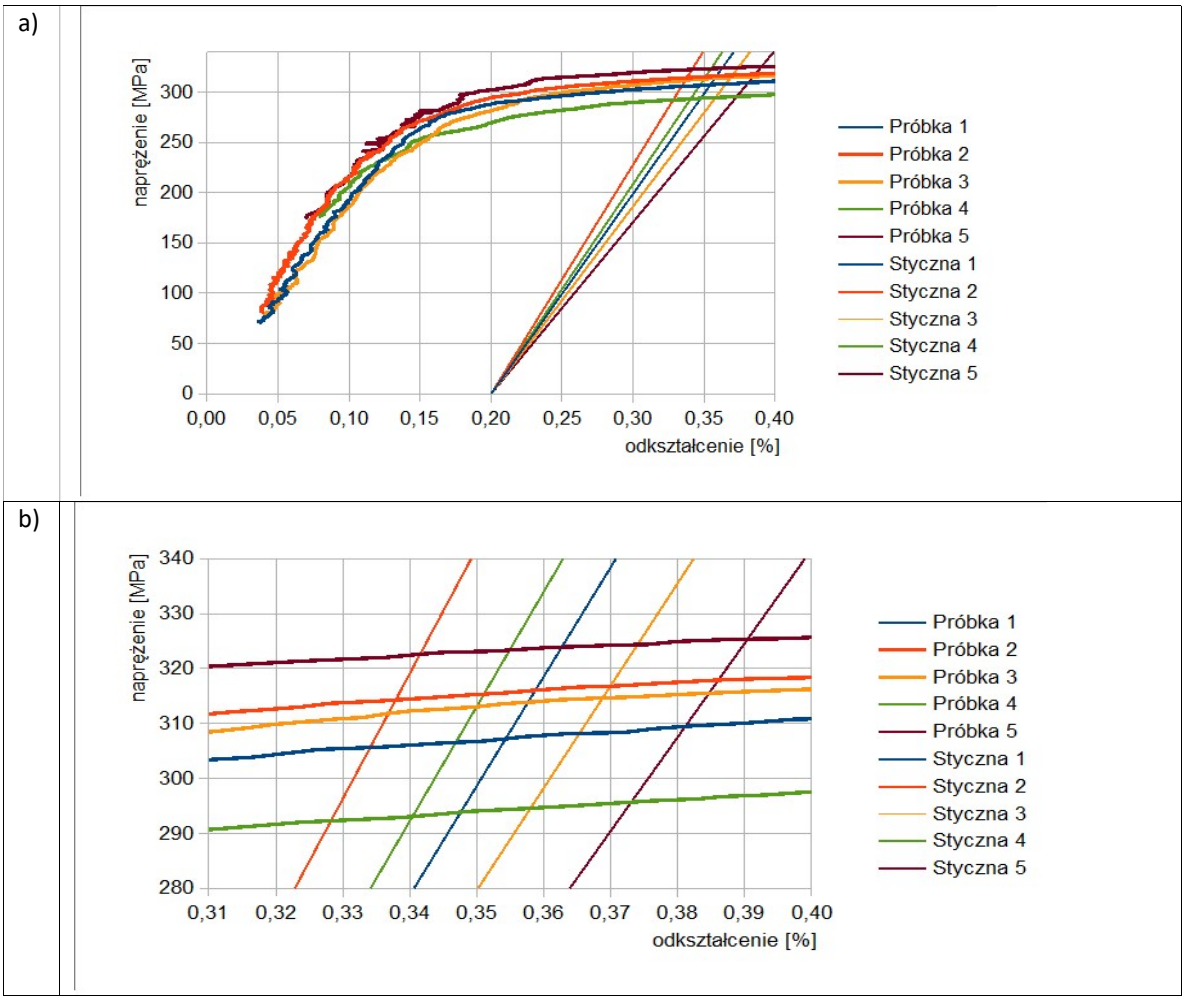
Rys. 5.6. Ustalanie modułu Younga *E* za pomocą prostych regresji dla badanych próbek

Tablica 5.4. Wartości modułu Younga *E* wyznaczone na podstawie pomiaru ekstensometrem optycznym (por. Rys. 5.6)

Numer próbki	Średnia wartość pola przekroju na długości pomiarowej $A_{0,śr}$ [mm^2]	Moduł Younga E [GPa]
Próbka 1	452	199
Próbka 2	462	228
Próbka 3	457	186
Próbka 4	456	209
Próbka 5	463	171

Reasumując wyniki podane w Tablicy 5.4 można stwierdzić, że średnia wartość modułu Younga wynosi 199 GPa. Odrzucając wartość najniższą otrzymuje się 206 GPa, a odrzucając dwie wartości skrajne 198 GPa. Średnia wartość modułu Younga mieści się w zakresie standardowej wartości modułu Younga dla stali niskowęglowych (ok. 205 GPa). W Eurokodzie 3 znajdujemy nieco wyższą wartość modułu Younga, wynoszącą 210 GPa.

Wykres krzywej rozciągania stosowany do określenia umownej granicy plastyczności był modyfikowany w taki sposób, aby prosta o nachyleniu wyznaczonym, jak opisano wcześniej, przechodziła przez początek układu współrzędnych. Następnie wartość umownej granicy plastyczności ustalono, jako punkt przecięcia prostej równoległej do stycznej z prostoliniową częścią wykresu krzywej rozciągania (por. Rys. 5.6). Prosta ta przecina oś odciętych przy wartości 0,2%. Sposób ustalania umownej granicy plastyczności $R_{e,02}$ przedstawiono na rysunku 5.7, zaś wartości granicy plastyczności odniesione do przekroju początkowego zestawiono w Tablicy 5.5.



Rys. 5.7. Sposób ustalania umownej granicy plastyczności $R_{e,02}$, a) przebieg wykresów od początku układu współrzędnych, b) analizowany fragment wykresów

Tablica 5.5. Wartości umownej granicy plastyczności $R_{e,02}$

Numer próbki	Średnia wartość pola przekroju na długości pomiarowej $A_{0,śr}$ [mm^2]	Umowna granica plastyczności $R_{e,02}$ [MPa]
Próbka 1	452	307,2
Próbka 2	462	314,3
Próbka 3	457	314,6
Próbka 4	456	293,1
Próbka 5	463	325,4

Wartość średnia umownej granicy plastyczności odniesiona do średniej wartości przekroju początkowego $A_{0,śr}$ wyniosła $R_{e,02,śr}$ = 310,9 MPa, odchylenie standardowe 11,90 MPa, a wskaźnik zmienności 3,83%. Odrzucając skrajny wynik dla próbki nr 4, otrzymujemy odpowiednio: $R_{e,02,śr}$ =315,4 MPa, odchylenie standardowe =7,51 MPa i wskaźnik zmienności = 2,38%.

Wartość charakterystyczna umownej granicy plastyczności, wyznaczona dla pięciu próbek według załącznika D do normy PN-EN 1990:2004, przy założeniu współczynnika konwersji równego 1, wynosi $R_{e,02,k} = f_y$ = 310,9·(1-1,80·0,0383) = 289 MPa.

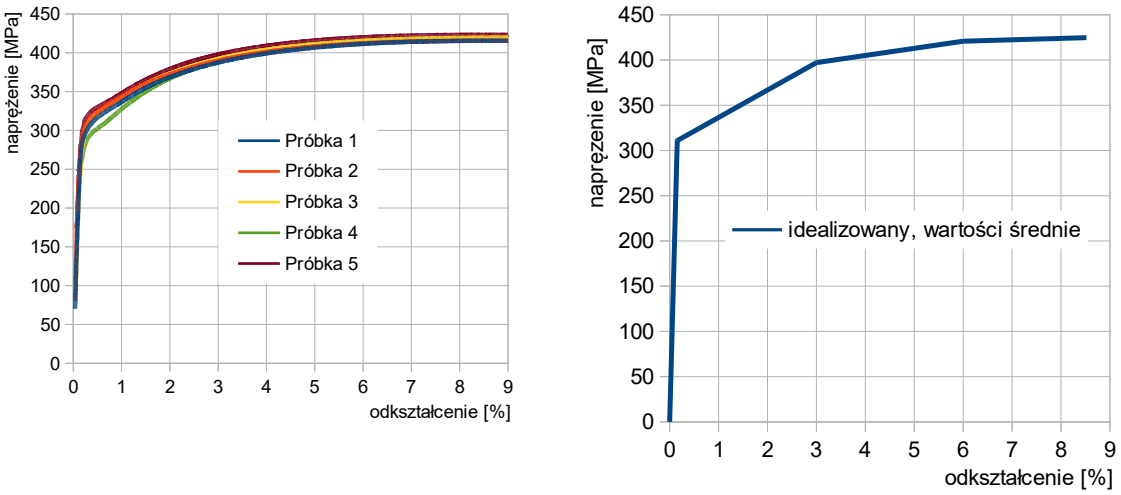
Wartość obliczeniowa umownej granicy plastyczności, wyznaczona według załącznika D do normy PN-EN 1990:2004, wynosi $R_{e,02,d} = f_y / \gamma_{M0}$ = 310,9·(1-3,37·0,0383) = 271 MPa. Współczynnik materiałowy wynosi γ_{M0} = 289/271 = 1,07 i jest to wartość standardowa.

Wyznaczenie modułu stycznego E_t po przejściu granicy plastyczności

Ponieważ charakter krzywej „naprężenie-odkształcenie” jest paraboliczny, bez wyraźnej strefy płynięcia (szybkie przejście w strefę wzmocnienia), proponuje się przyjąć zastępczo krzywą łamaną, z wierzchołkami przy odkształceniu 3%, 6% i 8,52% (średnia wartość w chwili uzyskiwania wytrzymałości na rozciąganie R_m, po korekcie w stosunku do wartości 8,56% podanej w Tablicy 5.3; por Tablica 5.6). Skorzystano z korygowanych krzywych, tak jak dla umownej granicy plastyczności.

Tablica 5.6. Średnie wartości sił i naprężeń przy różnych poziomach odkształcenia, w odniesieniu do początkowego pola przekroju A_0

Numer próbki	Odkształcenie próbki 3%		Odkształcenie próbki 6%		Wartości odpowiadające wytrzymałości na rozciąganie			
	Siła [kN]	Naprężenie [MPa]	Siła [kN]	Naprężenie [MPa]	Max. siła rozciągająca F_m [kN]	Wydłużenie skorygowane [%]	Początkowe pole przekroju próbki A_0 [mm^2]	Wytrzymałość na rozciąganie R_m [MPa]
Próbka 1	175,07	397,0	185,95	421,7	187,84	8,704	441	425,9
Próbka 2	180,19	396,9	190,39	419,4	192,08	8,618	454	423,1
Próbka 3	179,24	393,9	189,90	417,4	191,80	8,898	455	421,5
Próbka 4	177,19	393,8	188,56	419,0	190,38	8,156	450	423,1
Próbka 5	184,16	403,9	194,43	426,4	195,96	8,223	456	429,7
średnio	-	**397,1**	-	**420,8**	-	**8,52**	**-**	**424,7**



Rys. 5.8. Propozycja przyjmowania krzywej rozciągania (w odniesieniu do pola początkowego przekroju). Kolejno odkształcenia: 0,156%, 3%, 6%, 8,52%, moduł Younga E=199 GPa; moduły styczne odpowiednio: E_t= 3,03 GPa, 0,79 GPa, 0,16 GPa

Pomiary i rezultaty Aramis/GOM Correlate

W ramach badań wytrzymałościowych, oprócz użycia ekstensometru optycznego, rejestrowano obraz za pomocą kamer systemu Aramis (Fot. 5.18) i programu GOM Correlate, za pomocą którego opracowuje się wyniki pomiaru. Pomiar poprzedzono kalibracją systemu (Fot. 5.18b). Dokonany jednocześnie pomiar linijką na powiększonych

obrazach z programu GOM Correlate, w porównaniu z odczytem wydłużeń nałożonego wirtualnego ekstensometru, potwierdził zgodność podawanych wydłużeń przy kilkuprocentowych odkształceniach. System Aramis nie sprawdził się przy analizie małych zmian w zakresie pracy sprężystej, jednak przy innych badaniach próbek rozciąganych wyniki były poprawne.

a)

b)

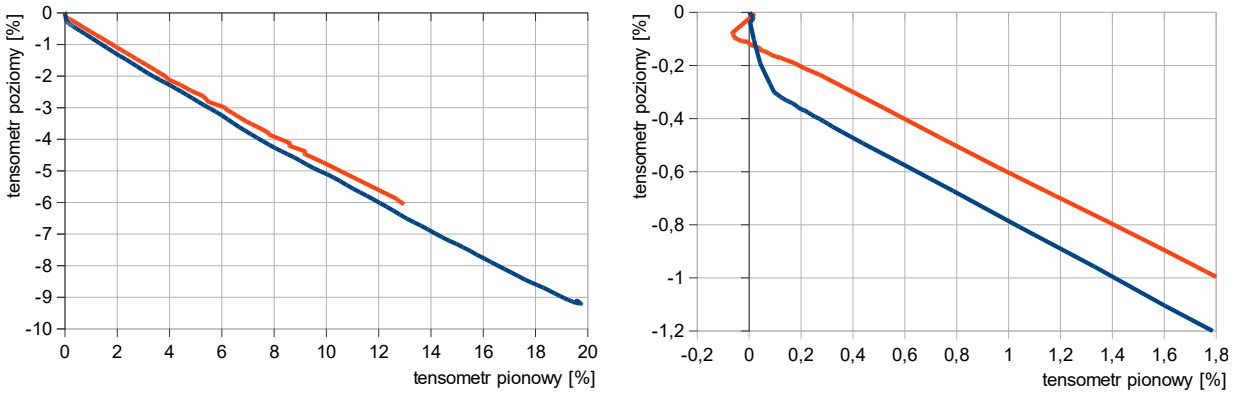
Fot. 5.18. Pomiary z użyciem systemu Aramis: a) kamery przy maszynie z zerwaną próbką, b) system w trakcie kalibracji (fot. własne)

W celu liczbowej oceny deformacji, w programie GOM Correlate założono na obraz otrzymany z systemu Aramis wirtualne ekstensometry. Analiza opiera się na zmianie wzajemnego położenia dwóch punktów w układzie współrzędnych, z osią *X* równoległą do osi próbki i płaszczyzną *XY* na płaszczyźnie obrazu początkowego.

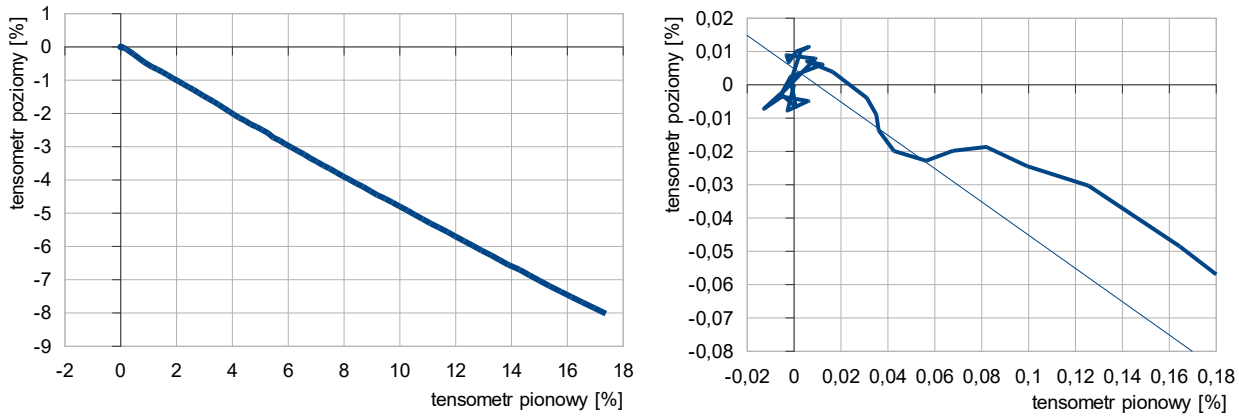
Długość zasadniczego wirtualnego ekstensometru w kierunku długości próbki przyjęto równą 60 mm, jako połowę z wartości $5{,}65 \cdot (A_0)^{0{,}5}$, czyli długości pomiarowej według normy PN-EN ISO 6892-1:2020-05, przy założeniu wymiaru przekroju próbki 15x30 mm.

Niestety, ze względu na zaistniałe niedokładności odczytów przy mniejszych odkształceniach, tj. podczas sprężystego zakresu pracy na początku badania, nie udało się uzyskać prawidłowego wyniku w celu wyznaczenia wartości modułu Younga. Przyjęto wartość modułu Younga ustaloną przy użyciu ekstensometru optycznego.

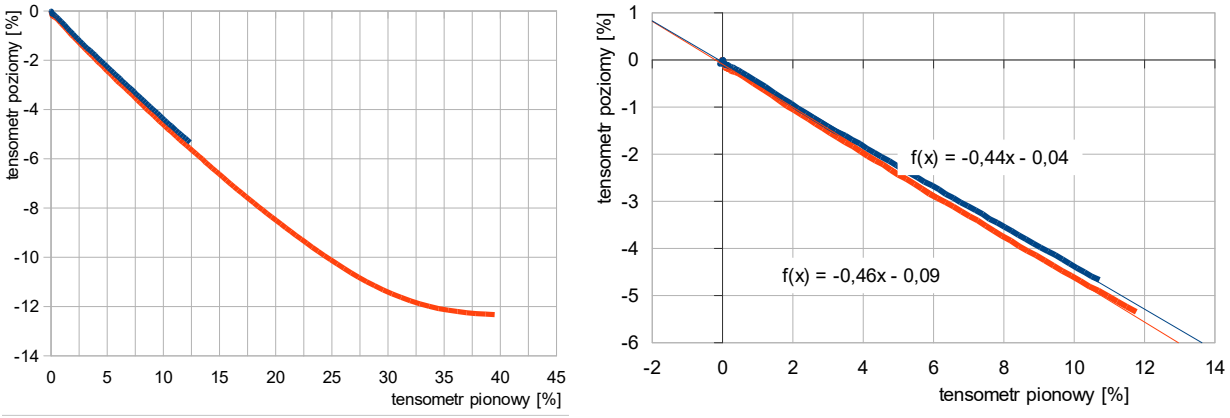
Do wyznaczenia współczynnika Poissona zastosowano „krzyże" złożone z dwóch prostopadle ułożonych wirtualnych tensometrów o długościach 15 mm, przecinających się w osi próbki. W zakresie pracy po uplastycznieniu uzyskano wartości współczynnika Poissona rzędu 0,45÷0,50 (por. Rys. 5.9÷5.11), natomiast w zakresie sprężystym nie udało się wyznaczyć współczynnika Poissona.



Rys. 5. 9. Odczyty odkształceń dla próbki nr 2 przy użyciu tensometru pionowego i poziomego



Rys. 5. 10. Odczyty odkształceń dla próbki nr 4 przy użyciu tensometru pionowego i poziomego



Rys. 5. 11. Odczyty odkształceń dla próbki nr 5 przy użyciu tensometru pionowego i poziomego

Wartości parametrów odniesione do zmieniającego się w trakcie badania przekroju próbki

Wartości odniesione do zmiennego w czasie i w funkcji siły obciążającej przekroju próbki nie mają zastosowania w przepisach projektowania i ich określanie nie jest ujęte w normach dotyczących próby rozciągania, natomiast można je określić dla potrzeb zaawansowanego modelowania.

Rzeczywista wartość wytrzymałości $R_{m,rzecz}$ i granicy plastyczności $R_{e,rzecz}$

W celu oszacowania pola przekroju, dla ustalenia tzw. rzeczywistej wytrzymałości na rozciąganie $R_{m,rzecz}$ w chwili osiągnięcia maksymalnej siły obciążającej F_m oraz rzeczywistej granicy plastyczności $R_{e,rzecz}$, dokonano zrzutów obrazów uzyskanych za

pomocą systemu Aramis i porównywano szerokości boku próbki w danym momencie badania z obrazem referencyjnym - początkowym. Założono również, w obszarze przyszłej szyjki, kontrolny, prostopadły do osi próbki, wirtualny tensometr o długości 25 mm.

W obliczeniach założono, że zmniejszenie wymiaru węższego boku próbki jest proporcjonalne do zmniejszenia wymiaru boku dłuższego. Takie założenie jest konieczne, gdyż sprzęt jakim dysponujemy nie pozwala na określenie przy użyciu ekstensometru optycznego zmiany szerokości węższego boku próbki.

Pole przekroju próbki obliczono ze wzoru:

$$A_m = b_m a_m \quad \text{lub} \quad A_e = b_e a_e , \tag{5.2}$$

w którym: a_m, b_m, a_e, b_e – wymiary boków z uwzględnieniem zwężenia się próbki, odpowiednio dla sił F_m i F_e.

Tablica 5.7. Wartości rzeczywistej wytrzymałości na rozciąganie $R_{m,rzecz}$ i granicy plastyczności $R_{e,rzecz}$

Numer próbki	Max. wartość siły rozciągającej F_m [kN]	Pole przekroju próbki (w chwili osiągnięcia siły F_m) A_m [mm^2]	Rzeczywista wytrzymałość na rozciąganie $R_{m,rzecz}$ [MPa]	Wartość siły na umownej granicy plastyczności F_e [kN]	Pole przekroju próbki A_e [mm^2]	Rzeczywista granica plastyczności $R_{e,rzecz}$ [MPa]
Próbka 1	187,84	368	511,1	138,9	438	317,1
Próbka 2	192,08	379	507,3	145,2	450	322,7
Próbka 3	191,80	381	502,9	143,8	452	318,1
Próbka 4	190,38	373	510,8	133,7	442	302,5
Próbka 5	195,96	383	512,1	150,7	451	334,1
średnio	-	-	**508,9**	-	-	**318,9**

Wartość charakterystyczna rzeczywistej wytrzymałości na rozciąganie wynosi 508,9·(1-1,80·0,00706) = 502 MPa, a wartość obliczeniowa rzeczywistej wytrzymałości na rozciąganie wynosi 508,9·(1-3,37·0,00706) = 496 MPa.

Wartość charakterystyczna rzeczywistej granicy plastyczności wynosi 318,9·(1-1,80·0,0358) = 298 MPa, a wartość obliczeniowa rzeczywistej granicy plastyczności wynosi 318,9·(1-3,37·0,0358) = 280 MPa.

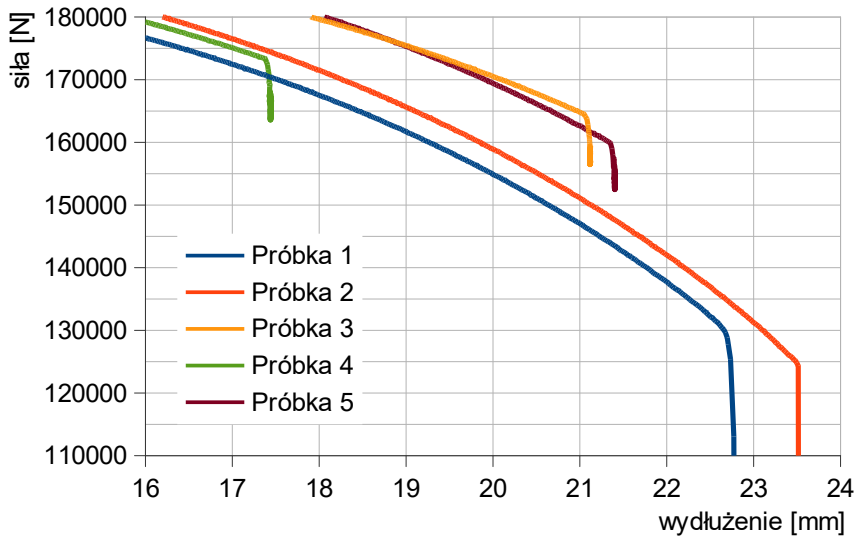
Naprężenie rzeczywiste zrywajace R_r

Ze względu na osypywanie się deseniu w stanie głębokiego uplastycznienia, nie było możliwe bezpośrednie odczytanie odkształceń w obszarze szyjkowania w trakcie tworzenia się szyjki za pomocą narzędzi Aramis/GOM Correlate. Należy dodać, że

odwarstwieniu uległaby również powłoka malarska na konstrukcji w stanie głębokiego uplastycznienia, dlatego aby określić rzeczywiste naprężenia przy zerwaniu próbki R_r, możliwy był jedynie pomiar manualny.

Naprężenie rzeczywiste zrywające tuż przed początkiem zerwania szyjki

Wartość „rzeczywistą" naprężenia zrywającego $R_{r,rzecz}$ określono dla ostatniej siły przed gwałtownym jej spadkiem (załamanie wykresu dla zależności „siła-wydłużenie" dla pomiaru ekstensometrem optycznym – Rys. 5.12). Punkt załamania się wykresu wybrano na podstawie różnic procentowych przyrostów i obserwacji powiększeń wykresu. Ponieważ w systemie Aramis zapis odbywa się co 1 sekundę, w przedstawionych wynikach pole jest nieco zawyżone, a wytrzymałość nieco zaniżona (w kierunku bezpiecznym).



Rys. 5.12. Analizowana część wykresu dla zależności „siła – wydłużenie" z widocznymi punktami załamania krzywych dla próbek 1÷5

W Tablicy 5.8 podano wartości określone przy zastosowaniu pola określonego, jak opisano wcześniej. W przypadku próbki nr 2 ostatnia wartość siły odnotowana w systemie Aramis przed zerwaniem wyniosła 127,5 kN (zatem przy nieco szerszej szyjce), a wartość siły odczytana z maszyny wyniosła 124,3 kN, zatem wartość końcowego naprężenia podana w Tablicy 5.8 jest nieco zaniżona. Dla próbki nr 1 wartość siły odnotowana w systemie Aramis wyniosła 131,9 kN.

Tablica 5.8. Oszacowanie wartości rzeczywistego naprężenia zrywającego (dla „załamania krzywej")

Numer próbki	Siła zrywająca F_r [kN]	Pole przekroju próbki przy sile zrywającej A_r [mm^2]	Rzeczywiste wartości naprężenia zrywającego $R_{r,rzecz}$ [MPa]
		Z systemu Aramis dla siły F_r	
Próbka 1	125,4	191	655,7
Próbka 2	124,3	183	680,8
Próbka 3	163,8	259	631,5
Próbka 4	173,4	283	612,5
Próbka 5	159,9	237	674,5
średnio	-	-	**651,0**

Wartość charakterystyczna rzeczywistego naprężenia zrywającego wynosi 651,0·(1-1,80·0,0443) = 599 MPa, zaś jej wartość obliczeniowa wynosi 651,0·(1-3,37·0,0443) = 554 MPa.

Naprężenie rzeczywiste zrywające – siły i przekroje końcowe

Zestawiono także wartości sił tuż przed zerwaniem (dla próbki nr 1 i 2) oraz ostatnich wartości sił zarejestrowanych w chwili automatycznego wyłączenia maszyny (dla próbek nr 3, 4 i 5). Dla tych sił oszacowano rzeczywiste naprężenia zrywające $R_{r,rzecz}$ biorąc pod uwagę pole przekroju A_r, ustalone na podstawie pomiarów w maszynie wytrzymałościowej próbek, obliczone według wzoru (5.1) i rysunku 5.4. Dla porównania, zestawiono także wartości odniesione do początkowego pola przekroju A_0.

Tablica 5.9. Oszacowanie wartości rzeczywistej wytrzymałości na zerwanie (dla ostatnich wartości sił zrywających)

Numer próbki	Siła zrywająca F_r [kN]	Pole przekroju próbki po badaniu A_r [mm^2]	Rzeczywista wytrzymałość na zerwanie $R_{r,rzecz}$ [MPa]	Początkowe pole przekroju próbki A_0 [mm^2]	Wytrzymałość na zerwanie R_r [MPa]
Próbka 1	113,09	149	759,0	441	256,4
Próbka 2	124,31	146	851,4	454	273,8
Próbka 3	156,57	246	636,5	455	344,1
Próbka 4	166,03	270	614,9	450	369,0
Próbka 5	152,78	232	658,5	456	335,0

Wartość średnia naprężenia z kolumny 4 z Tablicy 5.9 wynosi $R_{r,rzecz,śr}$ = 704,1 MPa, odchylenie standardowe wynosi 99,2 MPa, a wskaźnik zmienności 14,1%.

Wartość charakterystyczna według metodyki załącznika D do normy PN-EN 1990:2004 wynosi $R_{r,rzecz,k}$ = 704,1·(1-1,80·0,141) = 525 MPa, zaś wartość obliczeniowa wyznaczona według załącznika D do normy PN-EN 1990: 2004 wynosi $R_{r,rzecz,d}$ = 704,1·(1-3,37·0,141) = 370 MPa.

Wartość średnia rzeczywistej wytrzymałości na zerwanie, wyznaczona tylko dla zerwanych próbek nr 1 i 2 wynosi $R_{r,rzecz,śr}$ = 805,2 MPa. Wartość charakterystyczna $R_{r,rzecz,k}$ = 805,2·(1-2,01·0,081) = 674 MPa, a wartość obliczeniowa $R_{r,rzecz,d}$ = 805,2·(1-3,77·0,081) = 559 MPa (wartość współczynnika bezpieczeństwa wynosi 674/559 = 1,20).

Analizując wyniki otrzymane z badań wytrzymałościowych dla próbek nr 1÷5, można rekomendować bazowanie na wykresie zależności przedstawionych na rysunku 5.12. Wartości średnie, charakterystyczne i obliczeniowe zostały przyjęte zgodnie z zaleceniami normy Eurokod 0 (PN-EN 1990: 2004), które stosuje się w ocenie projektowej i eksperckiej. Wartości rzeczywistej wytrzymałości na zerwanie przyjęto dla ostatniej wartości siły przed gwałtownym jej spadkiem. Wartości naprężenia w chwili uzyskania na ekstensometrze optycznym wydłużeń 3% i 6% przedstawiono w Tablicy 5.10.

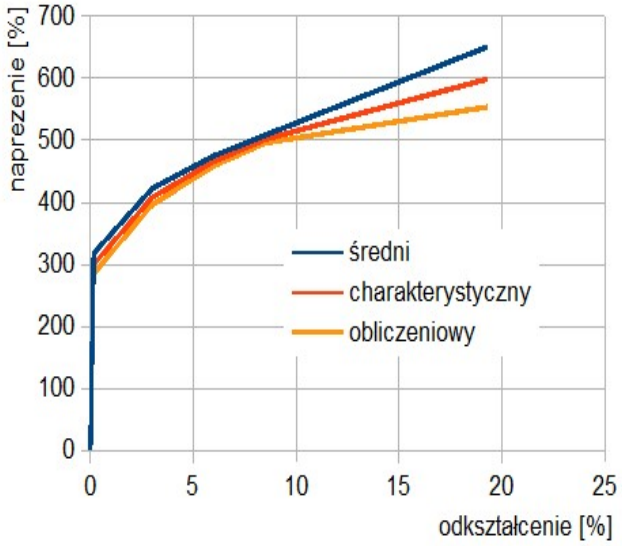
Tablica 5.10. Wartości naprężenia w chwili uzyskania na ekstensometrze optycznym wydłużeń 3% i 6 %

Numer próbki	Wartość siły przy wydłużeniu próbki o 3% $F_{3\%}$ [kN]	Pole przekroju przy wydłużeniu próbki o 3% $A_{3\%}$ [mm^2]	Naprężenie przy wydłużeniu próbki o 3% $R_{3\%}$ [MPa]	Wartość siły przy wydłużeniu próbki o 6% $F_{6\%}$ [kN]	Pole przekroju przy wydłużeniu próbki o 6% $A_{6\%}$ [mm^2]	Naprężenie przy wydłużeniu próbki o 6% $R_{6\%}$ [MPa]
Próbka 1	175,07	418	418,7	185,95	393	472,7
Próbka 2	180,19	423	426,0	190,39	402	473,6
Próbka 3	179,24	431	416,1	189,90	405	469,3
Próbka 4	177,19	425	416,8	188,56	395	477,7
Próbka 5	184,16	425	434,5	194,43	404	481,8
średnio	-	-	**422,4**	-	-	**475,0**

Wartość charakterystyczna średniego naprężenia przy wydłużeniu próbki o 3% wynosi 422,4·(1-1,80·0,0185) = 408 MPa, a przy wydłużeniu próbki o 6% wynosi 475,0·(1-1,80·0,0102) = 466 MPa.

Wartość obliczeniowa średniego naprężenia przy wydłużeniu próbki o 3% wynosi 422,4·(1-3,37·0,0185) = 396 MPa, a przy wydłużeniu o 6% wynosi 475,0·(1-3,37·0,0102) = 459 MPa.

Zależność „naprężenie – odkształcenie” przy założeniu zmieniającego się przekroju, czyli dla naprężeń rzeczywistych została przedstawiona na rysunku 5.13, zaś Tablica 5.11 zawiera wartości parametrów wyznaczone z rysunku 5.13.



Rys. 5.13. Wykres zależności „naprężenie – odkształcenie” przy założeniu zmieniającego się przekroju próbki

Tablica 5.11. Zestawienie parametrów wyznaczonych na podstawie zależności „naprężenie – odkształcenie” z rysunku 5.13

Wartość średnia		Wartość charakterystyczna		Wartość obliczeniowa		Wielkość
Odkształcenie [%]	Naprężenie [MPa]	Odkształcenie [%]	Naprężenie [MPa]	Odkształcenie [%]	Naprężenie [MPa]	
0,0	0	0,0	0	0,0	0	-
0,156	318	0,151	300	0,143	285	Granica plastyczności R_e
3,0	423	3,0	408	3,0	396	-
6,0	475	6,0	466	6,0	459	Wytrzymałość na rozciąganie R_m
8,52	509	8,52	502	8,52	496	Wytrzymałość na zerwanie R_r

6. ANALIZY NUMERYCZNE

W rozdziale tym została przedstawiona analiza wrażliwości dla rurociągu R1 ZWR Polkowice. Wybrane wyniki analizy numerycznej zostały opublikowane w pracach Duszyńskiej i in. (2023, 2024a, 2024b).

Parametry transportowanej mieszaniny piasku i skał zostały zestawione w Tablicy 6.1, natomiast parametry odnoszące się do eksploatacji rur oraz przedziałów zmienności parametrów obliczeniowych w Tablicach 6.2 i 6.3.

Tablica 6.1. Zestawienie parametrów dla analizowanej rury R1 ZWR Polkowice

parametry zmienne przedziałowe	X^-	X^+	wartość średnia X_0
prędkość ubytku ścianki rury $\bar{v}_u$ (mm/rok)	1,5	3,55	2,53
ciśnienie oddziaływujące na ścianki rury $\bar{p}$ (at)	5	12	8,5
gęstość transportowanej mieszaniny $\bar{\rho}$ (kg/m^3)	1124	1252	1188

Aby ocenić wpływ poszczególnych parametrów wyszczególnionych w Tablicy 6.1 zdecydowano się na odniesienie do wartości średniej wyznaczonej na podstawie wartości skrajnych przedziałów obliczeniowych. Analizowano wpływ zmienności tych parametrów poprzez analizowanie przebiegu rozwiązania dla parametrów odchylonych od wartości średniej o wartość $\Delta X_{\%} \equiv \Delta X$, gdzie procent odchylenia od wartości średniej $w_{\%}$ przyjmowano na poziomie 5, 10, 15 i 20% ($\bar{X} = [X^-, X^+]$, $X^- = \inf(\bar{X})$, $X^+ = \sup(\bar{X})$).

Obliczenia wykonywano na podstawie poniższych zależności:

$$X^- \equiv X^-_{\%} = X_0 - \Delta X = X_0 - \Delta X_{\%} \tag{6.1}$$

$$X^+ \equiv X^+_{\%} = X_0 + \Delta X = X_0 + \Delta X_{\%} \tag{6.2}$$

$$\Delta X \equiv \Delta X_{\%} = X_0 \cdot w_{\%}/100 \tag{6.3}$$

$$X_0 = \frac{(X^+ + X^-)}{2} \tag{6.4}$$

gdzie X_0 jest wartością średnią, ΔX jest odchyleniem od wartości średniej, $w_{\%}$ jest procentem odchylenia od wartości średniej.

Wartości odchyleń od wartości średniej, które były podstawą oceny wrażliwości rozwiązania zestawiono kolejno w Tablicy 6.2 w odniesieniu do wielkości odchylenia $w_{\%}$ wynoszącego 5% i 10%, oraz w Tablicy 6.3, w której zostały zestawione wielkości odchylenia wynoszące 15% i 20%.

Tablica 6.2 Zestawienie odchyleń od wartości średniej analizowanych parametrów rury R1 dla odchyleń $\Delta X = 5\%$ i 10%

parametry zmienne przedziałowe	5% odchylenie danego parametru od wartości średniej $\Delta X_{5\%}$	$X_{5\%}^{-}$	$X_{5\%}^{+}$	10% odchylenie danego parametru od wartości średniej $\Delta X_{10\%}$	$X_{10\%}^{-}$	$X_{10\%}^{+}$
prędkość ubytku ścianki rury $\bar{v}_u$ (mm/rok)	0,13	2,40	2,66	0,25	2,28	2,78
ciśnienie oddziaływujące na ścianki rury $\bar{p}$ (at)	0,43	8,07	8,93	0,85	7,65	9,35
gęstość transportowanej mieszaniny $\bar{\rho}$ (kg/m^3)	59,40	1128,60	1247,40	118,80	1069,20	1306,80

Tablica 6.3. Zestawienie odchyleń od wartości średniej analizowanych parametrów rury R1 dla odchyleń $\Delta X = 15\%$ i 20%

parametry zmienne przedziałowe	15% odchylenie danego parametru od wartości średniej $\Delta X_{15\%}$	$X_{15\%}^{-}$	$X_{15\%}^{+}$	20% odchylenie danego parametru od wartości średniej $\Delta X_{20\%}$	$X_{20\%}^{-}$	$X_{20\%}^{+}$
prędkość ubytku ścianki rury $\bar{v}_u$ (mm/rok)	0,38	2,15	2,91	0,51	2,02	3,04
ciśnienie oddziaływujące na ścianki rury $\bar{p}$ (at)	1,28	7,22	9,78	1,70	6,80	10,20
gęstość transportowanej mieszaniny $\bar{\rho}$ (kg/m^3)	178,20	1009,80	1366,20	237,60	950,40	1425,60

Objaśnienia do Tablic 6.2 i 6.3: ΔX jest analizowanym odchyleniem od wartości średniej, tj.: prędkości ubytku ścianki rury Δv_u, ciśnienia oddziałującego na ścianki rury Δp, gęstości transportowanej mieszaniny $\Delta \rho$

W pracy została wykonana analiza z zastosowaniem algorytmu przedziałowego przedstawionego w pracy Duszyńskiej i in. (2024), w której algorytm wymiarowania rur stalowych jest zdefiniowany odpowiednimi zależnościami (por. wzory (3.5)÷(3.10) w pracy Duszyńskiej i in, 2024a, 2024b). Analiza zgodnie z podanym algorytmem jest zagadnieniem liniowym fizycznie i geometrycznie, w którym jako kryterium uszkodzenia rury został przyjęty moment uplastycznienia ścianki. Dodatkowo, analizy obliczeniowe były wspomagane zastosowaniem metody Monte Carlo (losowanie wykonywano 500 razy), zakładając, że rozpatrywane zmienne są zmiennymi losowymi o rozkładzie liniowym.

Obliczenia przeprowadzono przy założeniu, że wielkością przedziałową jest tylko jedna z analizowanych wielkości, podczas gdy pozostałe wielkości pozostają niezmienione w odniesieniu do wartości średniej. Wyniki obliczeń zostały przedstawione na wykresach w funkcji czasu t oraz ubytku ścianki $\mathrm{v_u}(t)$, który jest przy założeniu stałej prędkości ubytku definiowany zależnością:

$$\mathrm{v_u}(t) = t \cdot \mathrm{v_u} \tag{6.5}$$

gdzie $\mathrm{v_u}$ oznacza prędkość ubytku ścianki (oznaczenie jest tu wartością deterministyczną i jest umieszczane na wykresach na osi x razem z czasem i powinno być rozumiane zgodnie z równaniem (6.5)).

Aby uniknąć sytuacji, w której w algorytmie dojdzie do dzielenia przez zero (ze względu na czytelność otrzymanych wyników), minimalna obliczeniowa grubość ścianki została przyjęta na poziomie $h_{min} = 0{,}8$ mm. Po przekroczeniu tych wartości grubość ścianki nie ulegała dalszej redukcji.

6.1. Wpływ prędkości ubytku grubości ścianek rury na czas uszkodzenia rurociągu

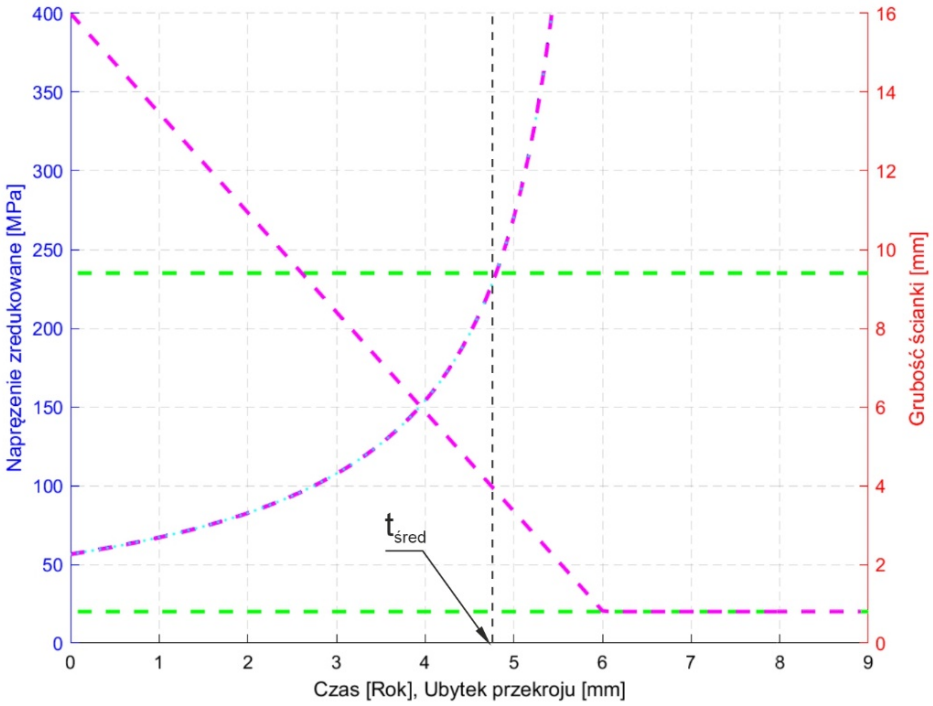
W pracy zostały przeprowadzone obliczenia, których celem było określenie czasu uszkodzenia ścianek dla wartości średnich parametrów modelu. Zgodnie z Tablicą 6.1 przyjęto do obliczeń: a) graniczną prędkość ubytku ścianki $\mathrm{v_{u,0}}$ = 2,53 mm/rok, b) ciśnienie działające na ścianki rury $p_0 = 8{,}5$ at, c) graniczną wartość gęstości mieszaniny $\rho_0 = 1188\ \mathrm{kg/m^3}$. Wyniki obliczeń zostały przedstawione na rysunku 6.1.

Na podstawie wykonanych obliczeń przyjęto, że średni czas uszkodzenia elementu wynosi $t_0 = 4{,}8$ roku. Względem tej wartości szacowano odchylenia od czasu uszkodzenia ścianki we wszystkich analizowanych schematach.

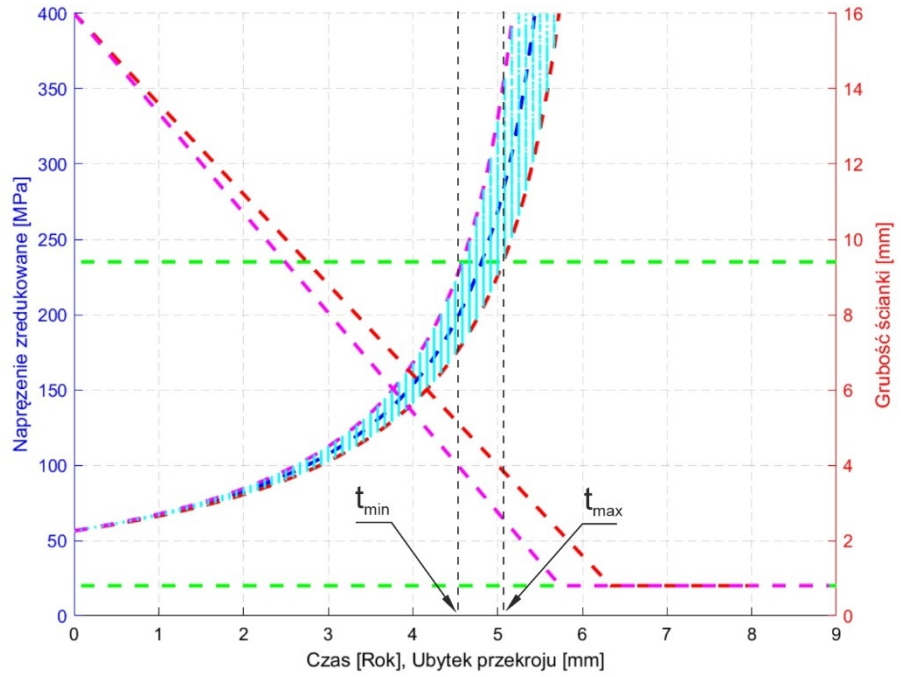
6.2. Wpływ zmienności prędkości ubytku ścianek rury na czas osiągnięcia granicznej wartości wytrzymałości

Celem obliczeń była ocena wpływu zmienności prędkości ubytku ścianek rury, $\bar{\mathrm{v}}_{\mathrm{u}}$, na czas osiągnięcia granicznej wartości wytrzymałości.

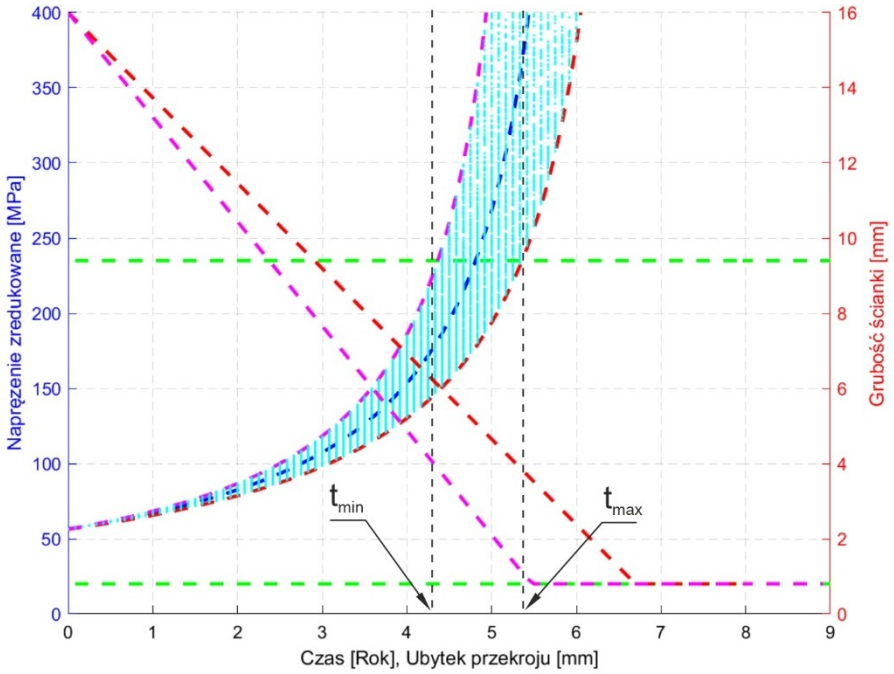
Wyniki uzyskane w wyniku obliczeń zostały przedstawione kolejno przy założeniu odchylenia prędkości ubytku ścianki od wartości średniej $\mathrm{v}_{\mathrm{u},0}$ o wartość: a) $w_{\%}$=5%, Rys. 6.2, b) $w_{\%}$=10%, Rys. 6.3, c) $w_{\%}$=15%, Rys. 6.4 oraz d) $w_{\%}$ =20%, Rys. 6.5. Na rysunku 6.2, przedstawiono przebieg zmian naprężeń zredukowanych $\bar{\sigma}_{red}$ oraz grubości ścianki $\bar{h}(t)$ w funkcji czasu t oraz ubytku ścianki $\mathrm{v}_{\mathrm{u}}(t)$, przy założeniu granicznych wartości prędkości ubytku ścianki $\bar{\mathrm{v}}_{\mathrm{u}}^{-} = 2{,}40\ \mathrm{mm/rok}$ oraz $\bar{\mathrm{v}}_{\mathrm{u}}^{+} = 2{,}66\ \mathrm{mm/rok}$, por. Tablica 6.2. Obliczenia odpowiadające odchyleniu zmiennej prędkości ubytku ścianki od wartości średniej o wartość $w_{\%} = 10\%$ $\Delta\mathrm{v}_{\mathrm{u},10\%}$, przedstawiono na rysunku 6.3. Obliczenia wykonywano przy założeniu przedziału granicznych prędkości ubytku ścianki $\bar{\mathrm{v}}_{\mathrm{u}}^{-} = 2{,}28\ \mathrm{mm/rok}$ oraz $\bar{\mathrm{v}}_{\mathrm{u}}^{+} = 2{,}78\ \mathrm{mm/rok}$, por. Tablica 6.2. Na kolejnych rysunkach 6.4 i 6.5 przedstawione zostały obrazy graficzne odpowiadające odpowiednio odchyleniu prędkości ubytku od wartości średniej o $\Delta\mathrm{v}_{\mathrm{u},15\%}$ i $\Delta\mathrm{v}_{\mathrm{u},20\%}$. W tych przypadkach graniczne prędkości ubytku ścianki wynosiły odpowiednio $\bar{\mathrm{v}}_{\mathrm{u}}^{-} = 2{,}15\ \mathrm{mm/rok}$ oraz $\bar{\mathrm{v}}_{\mathrm{u}}^{+} = 2{,}91\ \mathrm{mm/rok}$,
w przypadku odchylenia 15%, oraz $\bar{\mathrm{v}}_{\mathrm{u}}^{-} = 2{,}02\ \mathrm{mm/rok}$ i $\bar{\mathrm{v}}_{\mathrm{u}}^{+} = 3{,}04\ \mathrm{mm/rok}$ w przypadku odchylenia 20%. Wszystkie analizowane wyniki obliczeń zestawione zostały w Tablicy 6.3 z dokładnością do dwóch miejsc po przecinku.



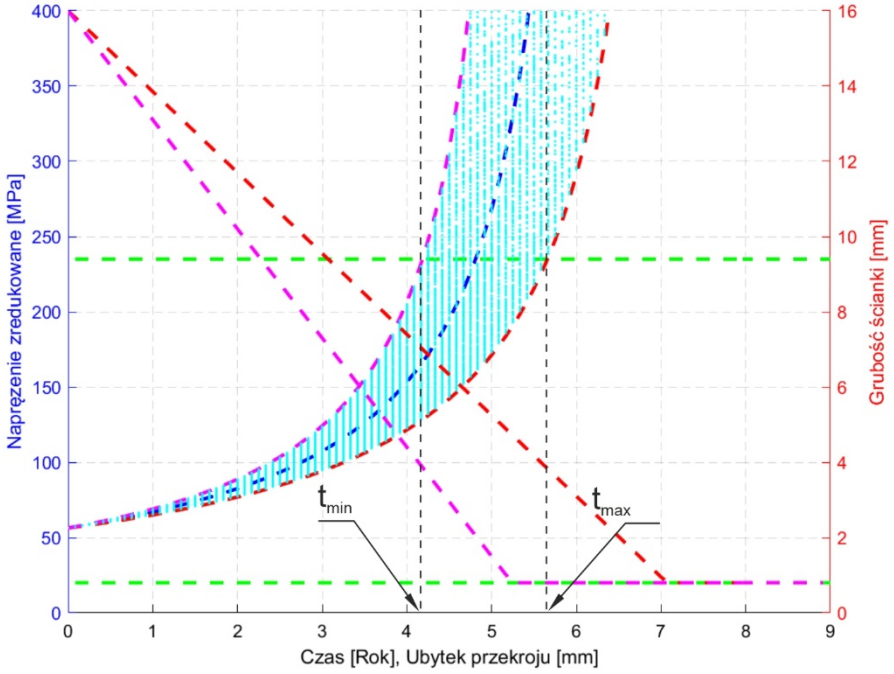
Rys. 6.1. Przebieg zmian naprężeń zredukowanych $\bar{\sigma}_{red}$ oraz grubości ścianki $h(t)$ w funkcji czasu oraz ubytku ścianki, przy założeniu średnich parametrów obliczeniowych – odchylenie $w_{\%} = 0\%$



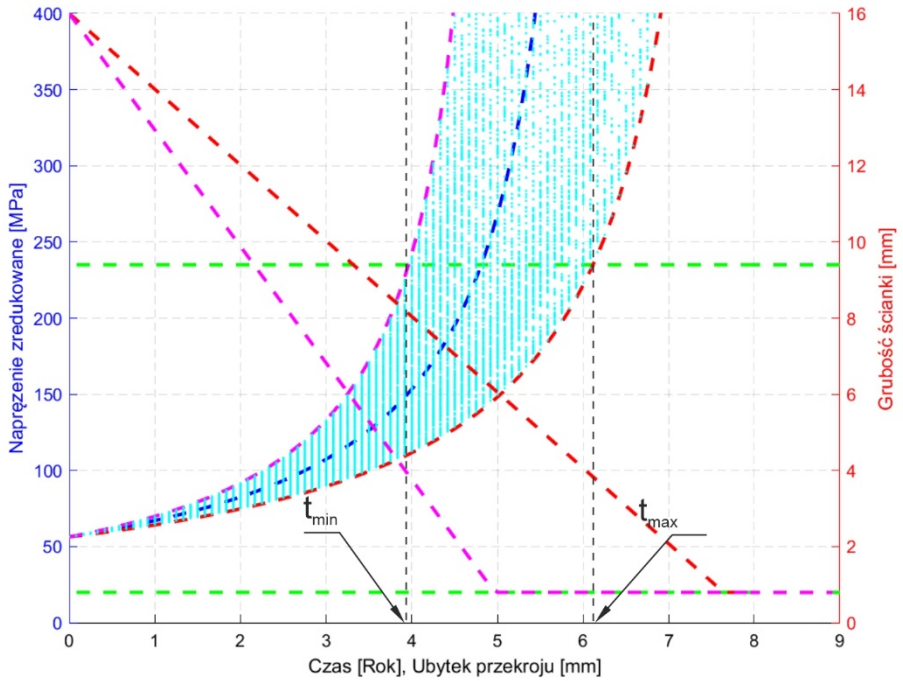
Rys. 6.2. Przebieg zmian naprężeń zredukowanych $\bar{\sigma}_{red}$ oraz grubości ścianki $\bar{h}(t)$ w funkcji czasu oraz ubytku ścianki, przy założeniu granicznych prędkości ubytku ścianki $\bar{v}_u^- = 2{,}40\ \mathrm{mm/rok}$ oraz $\bar{v}_u^+ = 2{,}66\ \mathrm{mm/rok}$ – odchylenie $w_{\%}$ =5%



Rys. 6.3. Przebieg zmian naprężeń zredukowanych $\bar{\sigma}_{red}$ oraz grubości ścianki $\bar{h}(t)$ w funkcji czasu oraz ubytku ścianki, przy założeniu granicznych prędkości ubytku ścianki $\bar{v}_u^- = 2{,}28\ \mathrm{mm/rok}$ oraz $\bar{v}_u^+ = 2{,}78\ \mathrm{mm/rok} -$ odchylenie $w_{\%} = 10\%$



Rys. 6.4. Przebieg zmian naprężeń zredukowanych $\bar{\sigma}_{red}$ oraz grubości ścianki $\bar{h}(t)$ w funkcji czasu oraz ubytku ścianki, przy założeniu granicznych prędkości ubytku ścianki $\bar{v}_u^- = 2{,}15\ \mathrm{mm/rok}$ oraz $\bar{v}_u^+ = 2{,}91\ \mathrm{mm/rok} -$ odchylenie $w_{\%} = 15\%$



Rys. 6.5. Przebieg zmian naprężeń zredukowanych $\bar{\sigma}_{red}$ oraz grubości ścianki $\bar{h}(t)$ w funkcji czasu oraz ubytku ścianki, przy założeniu granicznych prędkości ubytku ścianki $\bar{v}_u^- = 2{,}02\ \mathrm{mm/rok}$ oraz $\bar{v}_u^+ = 3{,}04\ \mathrm{mm/rok} - \mathrm{odchylenie}\ w_{\%} = 20\%$

Można zaobserwować bardzo duży wpływ zmiany prędkości ubytku ścianki rury na czas osiągnięcia granicznych wartości naprężeń zredukowanych $\bar{\sigma}_{red}$ w ściance rury, jak również na czas, po którym zostaje osiągnięta krytyczna grubość ścianki (przy której dochodzi do osiągnięcia wytrzymałości stali f_y). Naprężenia graniczne były uzyskiwane dla ścianki rury $h(t) = 4\,mm$. Aby zobrazować w sposób szacunkowy rozrzut uzyskiwanych wyników przeanalizowano czasy, po których zostaje wyczerpana nośność rury. Uzyskane wyniki orientacyjnych czasów odpowiadające osiągnięciu naprężeń granicznych t_{max} oraz t_{min} przy zmiennej prędkości ubytku zestawiono w Tablicy 6.4.

Tablica 6.4. Zestawienie granicznych wartości czasów osiągnięcia granicy plastyczności w ściankach rury (w odniesieniu do $\bar{v}_u$) w zależności od procentowego odchylenia prędkości ubytku od wartości średniej $\Delta v_{u,\%}$

zmienne	$\Delta v_{u,5\%}$	$\Delta v_{u,10\%}$	$\Delta v_{u,15\%}$	$\Delta v_{u,20\%}$
t_{min} (rok)	4,5	4,3	4,1	3,9
t_{max} (rok)	5,1	5,4	5,7	6,1

gdzie t_{min} jest czasem osiągnięcia granicy plastyczności f_y przy maksymalnej prędkości ubytku, t_{max} jest czasem osiągnięcia granicy plastyczności f_y przy minimalnej prędkości ubytku.

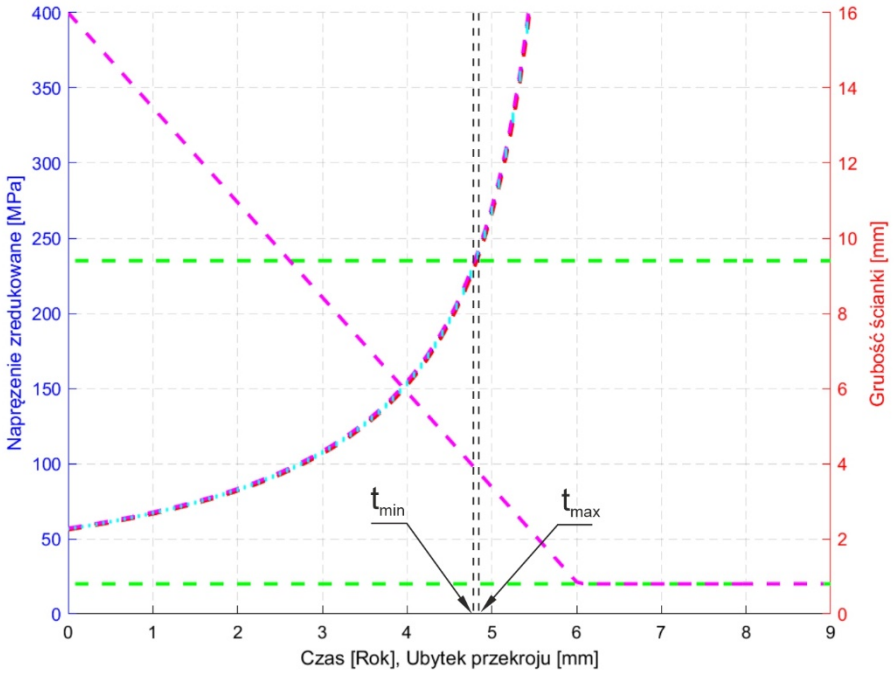
6.3. Wpływ zmienności ciśnienia mieszaniny w rurociągu na czas osiągnięcia granicznej wartości wytrzymałości

Kolejnym etapem obliczeń była ocena wpływu zmienności wielkości ciśnienia działającego na ścianki rury $\bar{p}$ na czas osiągnięcia granicznej wartości wytrzymałości. Wyniki uzyskane w wyniku obliczeń zostały przedstawione kolejno przy założeniu odchylenia zmiennego ciśnienia działającego na ścianki od wartości średniej p_0 o wartość: a) $w_{\%}$=5%, Rys. 6.6, b) $w_{\%}$=10%, Rys. 6.7, c) $w_{\%}$=15%, Rys. 6.8, d) $w_{\%}$=20%, Rys. 6.9. Na rysunku 6.6 przedstawiono przebieg zmian naprężeń zredukowanych $\bar{\sigma}_{red}$ oraz grubości ścianki $\bar{h}(t)$ w funkcji czasu t oraz ubytku ścianki $v_u(t)$, przy założeniu granicznych wartości ciśnienia działającego na ścianki $\bar{p}^- = 8{,}07$ at oraz $\bar{p}^+ = 8{,}93$ at, por. Tablica 6.2. Obliczenia odpowiadające odchyleniu zmiennej prędkości ubytku ścianki od wartości średniej równego $\Delta p_{10\%}$, przedstawiono na rysunku 6.7. Obliczenia wykonywano przy założeniu granicznych wartości ciśnienia działającego na ścianki $\bar{p}^- = 7{,}65$ at oraz $\bar{p}^+ = 9{,}35$ at, por. Tablica 6.2. Na kolejnych rysunkach 6.8 i 6.9 zostały przedstawione obrazy graficzne odpowiadające odpowiednio odchyleniu ciśnienia działającego na ścianki rury wartości średniej o $\Delta p_{15\%}$ i $\Delta p_{20\%}$. W tych przypadkach graniczne ciśnienia działającego na ścianki wynosiły odpowiednio $\bar{p}^- = 7{,}22$ at oraz $\bar{p}^+ = 9{,}78$ at, w przypadku odchylenia 15%, oraz $\bar{p}^- = 6{,}80$ at i $\bar{p}^+ = 10{,}20$ at, w przypadku odchylenia 20% (por. Tablica 6.3).

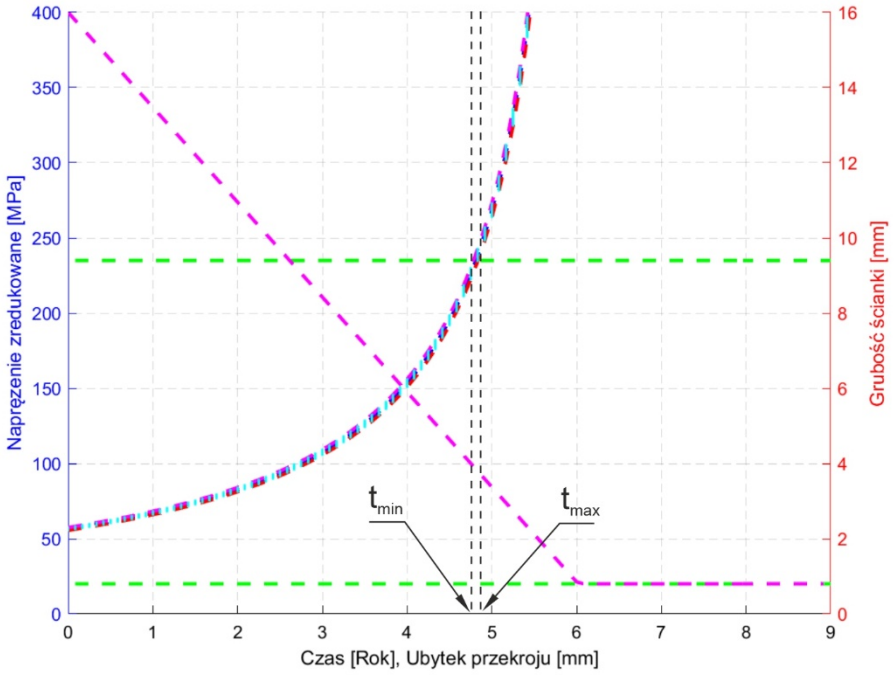
Można zaobserwować niewielki wpływ tego parametru na czas osiągnięcia granicznych wartości naprężeń zredukowanych $\bar{\sigma}_{red}$ w ściance rury jak również na czas, po którym osiągnięta zostaje krytyczna grubość ścianki (przy której dochodzi do osiągnięcia wytrzymałości stali f_y, naprężenia graniczne są uzyskiwane dla ścianki rury $h(t) = 4\ mm$). Aby zobrazować w sposób szacunkowy rozrzut uzyskiwanych wyników przeanalizowano czasy, po których zostaje wyczerpana nośność rury. Uzyskane wyniki orientacyjnych czasów odpowiadające osiągnięciu naprężeń granicznych t_{max} oraz minimalnej prędkości ubytku t_{min} zestawiono w Tablicy 6.5.

Tablica 6.5. Zestawienie granicznych wartości czasów osiągnięcia granicy plastyczności w ściankach rury (w odniesieniu do $\bar{p}$) w zależności od procentowego odchylenia ciśnienia mieszaniny od wartości średniej $\Delta p_{\%}$

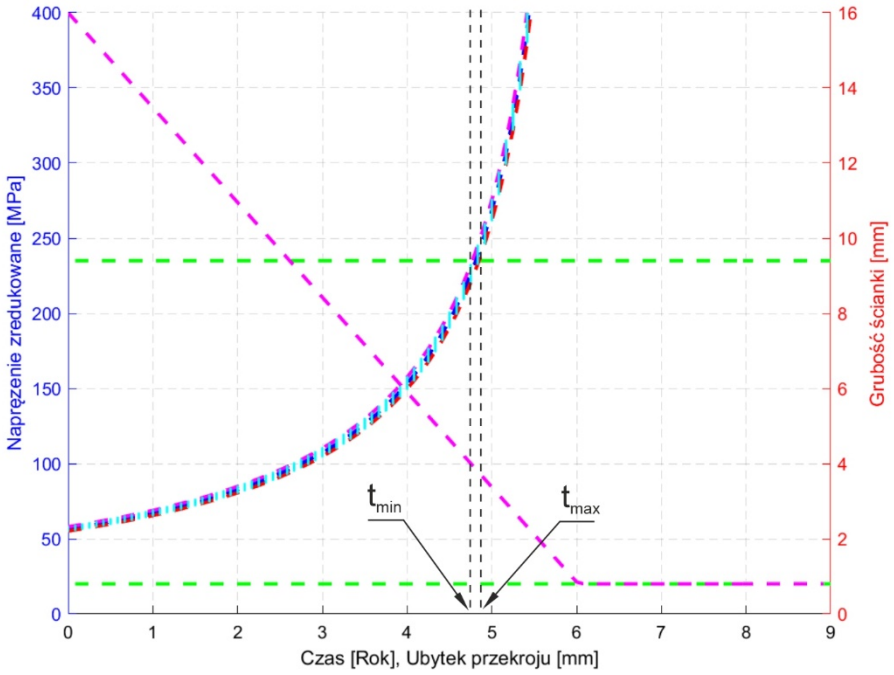
zmienne	$\Delta p_{5\%}$	$\Delta p_{10\%}$	$\Delta p_{15\%}$	$\Delta p_{20\%}$
t_{min} (rok)	4,775	4,75	4,725	4,7
t_{max} (rok)	4,825	4,85	4,875	4,9



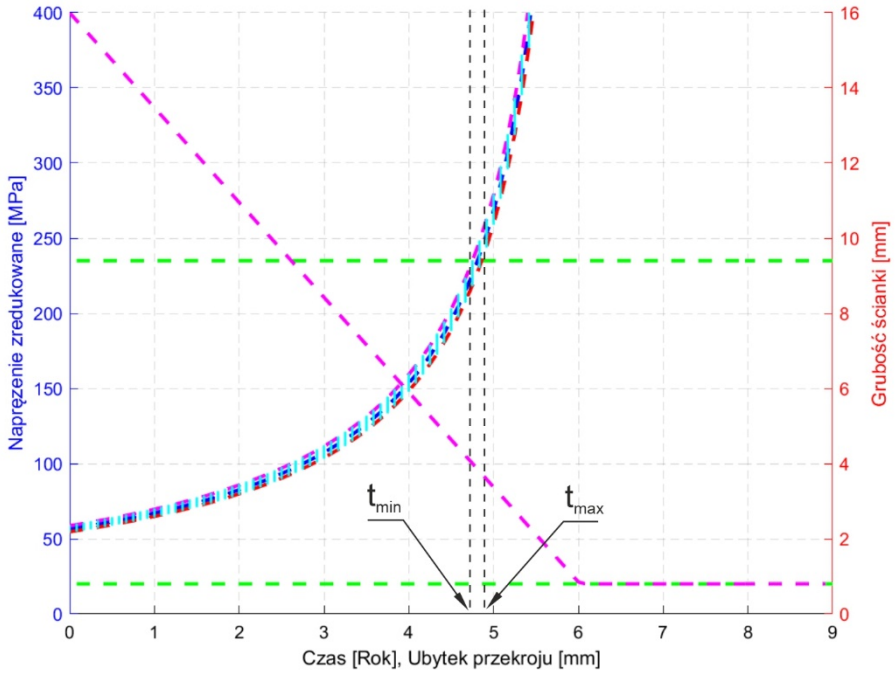
Rys. 6.6. Przebieg zmian naprężeń zredukowanych $\bar{\sigma}_{red}$ oraz grubości ścianki $\bar{h}(t)$ w funkcji czasu oraz ubytku ścianki, przy założeniu granicznych wartości ciśnienia w rurociągu $\bar{p}^{-} = 8{,}07$ at oraz $\bar{p}^{+} = 8{,}93$ at $-$ odchylenie $w_{\%} = 5\%$



Rys. 6.7. Przebieg zmian naprężeń zredukowanych $\bar{\sigma}_{red}$ oraz grubości ścianki $\bar{h}(t)$ w funkcji czasu oraz ubytku ścianki, przy założeniu granicznych wartości ciśnienia w rurociągu $\bar{p}^{-} = 7{,}65$ at oraz $\bar{p}^{+} = 9{,}35$ at $-$ odchylenie $w_{\%} = 10\%$



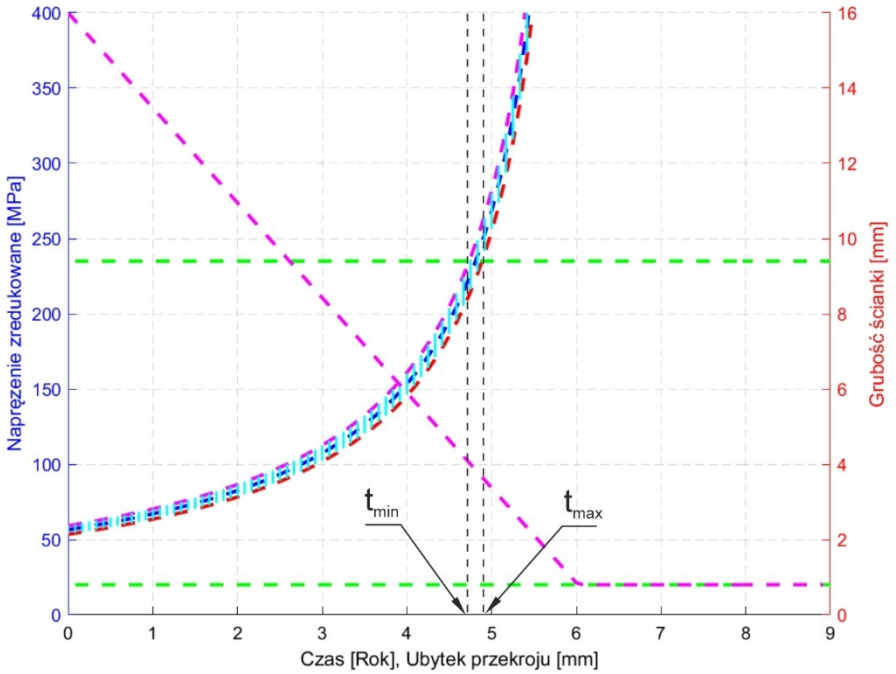
Rys. 6.8. Przebieg zmian naprężeń zredukowanych $\bar{\sigma}_{red}$ oraz grubości ścianki $\bar{h}(t)$ w funkcji czasu oraz ubytku ścianki, przy założeniu granicznych wartości ciśnienia w rurociągu $\bar{p}^{-} = 7{,}22$ at oraz $\bar{p}^{+} = 9{,}78$ at – odchylenie $w_{\%} = 15\%$



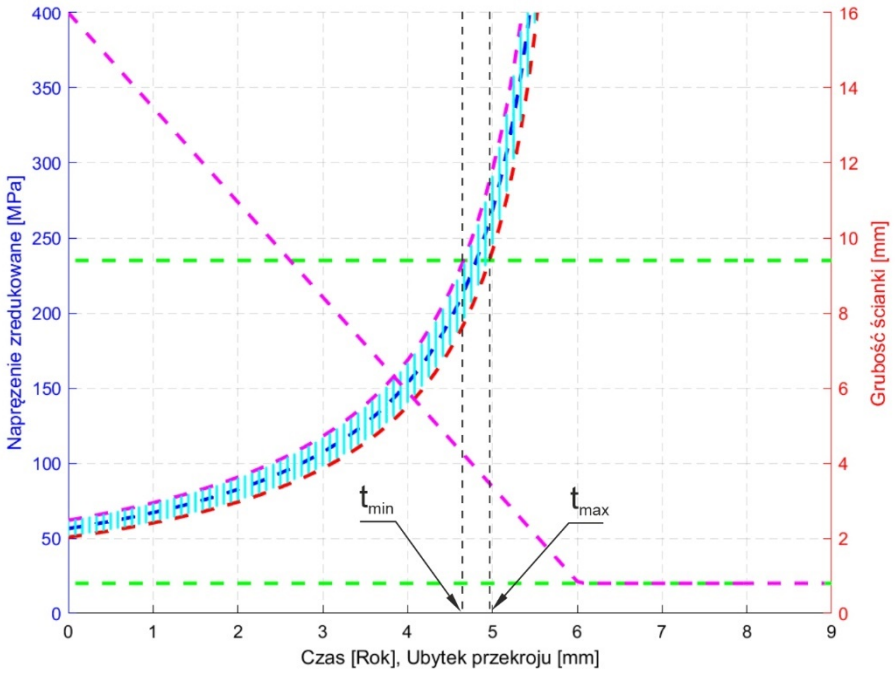
Rys. 6.9. Przebieg zmian naprężeń zredukowanych $\bar{\sigma}_{red}$ oraz grubości ścianki $\bar{h}(t)$ w funkcji czasu oraz ubytku ścianki, przy założeniu granicznych wartości ciśnienia w rurociągu $\bar{p}^{-} = 6{,}80$ at oraz $\bar{p}^{+} = 10{,}20$ at – odchylenie $w_{\%} = 20\%$

6.4. Wpływ zmienności gęstości mieszaniny na czas osiągnięcia granicznej wartości wytrzymałości

Celem kolejnego etapu obliczeń była ocena wpływu zmienności wielkości opisującej gęstość transportowanej w rurach mieszaniny $\bar{\rho}$ na czas osiągnięcia granicznej wartości wytrzymałości. Wyniki uzyskane w wyniku obliczeń zostały przedstawione kolejno przy założeniu odchylenia gęstości mieszaniny od wartości średniej ρ_0 o wartość: a) $w_{\%}$=5%, Rys. 6.10, b) $w_{\%}$=10%, Rys. 6.11, c) $w_{\%}$=15%, Rys. 6.12, d) $w_{\%}$=20%, Rys. 6.13. Na rysunku 6.10 przedstawiono przebieg zmian naprężeń zredukowanych $\bar{\sigma}_{red}$ oraz grubości ścianki $\bar{h}(t)$ w funkcji czasu t oraz ubytku ścianki $v_u(t)$, przy założeniu granicznych wartości gęstości mieszaniny $\bar{\rho}^- = 1128{,}6\ \mathrm{kg/m^3}$ oraz $\bar{\rho}^+ = 1247{,}4\ \mathrm{kg/m^3}$, por. Tablica 6.2. Obliczenia odpowiadające odchyleniu zmiennej prędkości ubytku ścianki od wartości średniej równego $\Delta\rho_{10\%}$, przedstawiono na rysunku 6.11. Obliczenia wykonywano przy założeniu przedziału granicznych gęstości mieszaniny $\bar{\rho}^- = 1069{,}2\ \mathrm{kg/m^3}$ oraz $\bar{\rho}^+ = 1306{,}8\ \mathrm{kg/m^3}$, por. Tablica 6.2.



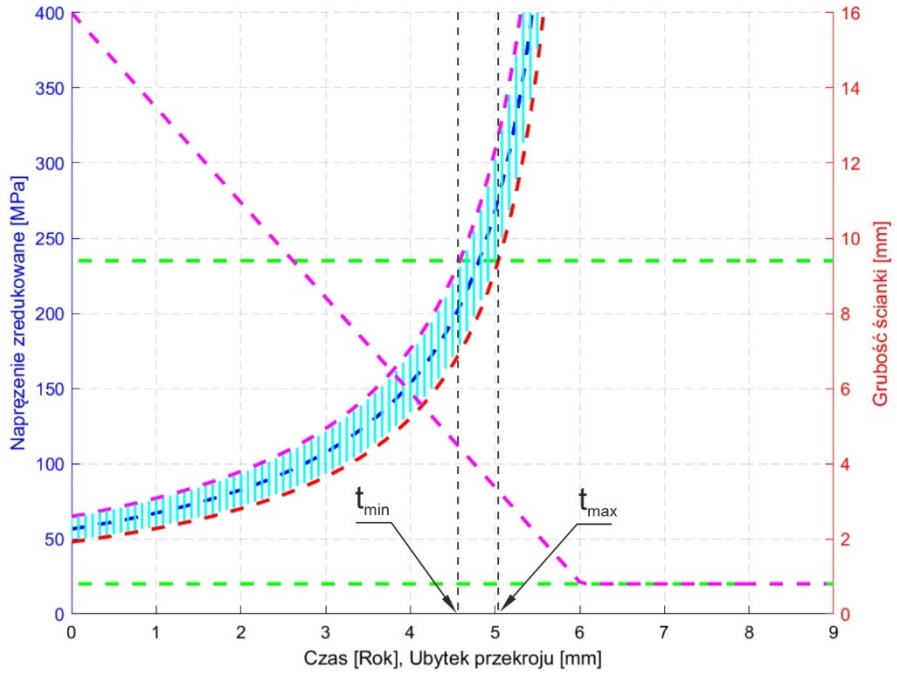
Rys. 6.10. Przebieg zmian naprężeń zredukowanych $\bar{\sigma}_{red}$ oraz grubości ścianki $\bar{h}(t)$ w funkcji czasu oraz ubytku ścianki, przy założeniu granicznych gęstości mieszaniny $\bar{\rho}^- = 1128{,}6\ \mathrm{kg/m^3}$ oraz $\bar{\rho}^+ = 1247{,}4\ \mathrm{kg/m^3}$ – odchylenie $w_{\%} = 5\%$



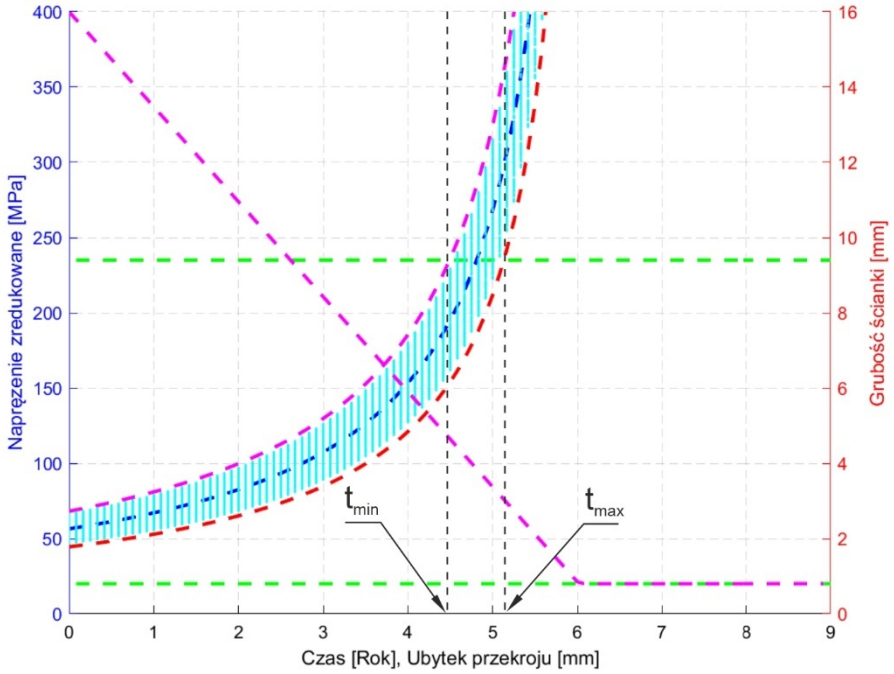
Rys. 6.11. Przebieg zmian naprężeń zredukowanych $\bar{\sigma}_{red}$ oraz grubości ścianki $\bar{h}(t)$ w funkcji czasu oraz ubytku ścianki, przy założeniu granicznych gęstości mieszaniny $\bar{\rho}^{-} = 1069{,}2\ \mathrm{kg/m^3}$ oraz $\bar{\rho}^{+} = 1306{,}8\ \mathrm{kg/m^3}$ – odchylenie $w_{\%} = 10\%$

Na kolejnych rysunkach 6.12 i 6.13 zostały przedstawione obrazy graficzne odpowiadające odpowiednio odchyleniu prędkości ubytku od wartości średniej o $\Delta\rho_{15\%}$ i $\Delta\rho_{20\%}$. W tych przypadkach graniczne gęstości mieszaniny wynosiły odpowiednio $\bar{\rho}^{-} = 1009{,}8\ \mathrm{kg/m^3}$ oraz $\bar{\rho}^{+} = 1366{,}2\ \mathrm{kg/m^3}$, w przypadku odchylenia 15% oraz $\bar{\rho}^{-} = 950{,}4\ \mathrm{kg/m^3}$ oraz $\bar{\rho}^{+} = 1425{,}6\ \mathrm{kg/m^3}$ w przypadku odchylenia 20%. Wszystkie analizowane wyniki obliczeń zestawione zostały w Tablicy 6.3.

Można zaobserwować istotny wpływ zmiany gęstości mieszaniny na czas osiągnięcia granicznych wartości naprężeń zredukowanych $\bar{\sigma}_{red}$ w ściance rury, jak również na czas, po którym zostaje osiągnięta krytyczna grubość ścianki, przy której dochodzi do osiągnięcia wytrzymałości stali f_y. Naprężenia graniczne, analogicznie jak we wszystkich pozostałych przypadkach, były uzyskiwane dla ścianki rury $h(t) = 4\ mm$. Aby zobrazować w sposób szacunkowy rozrzut uzyskiwanych wyników, podobnie jak w poprzednich przypadkach, przeanalizowano czasy, po których zostaje wyczerpana nośność rury. Uzyskane wyniki orientacyjnych czasów odpowiadające osiągnięciu naprężeń granicznych t_{max} oraz t_{min} zestawiono w Tablicy 6.6.



Rys. 6.12. Przebieg zmian naprężeń zredukowanych $\bar{\sigma}_{red}$ oraz grubości ścianki $\bar{h}(t)$ w funkcji czasu oraz ubytku ścianki, przy założeniu granicznych gęstości mieszaniny $\bar{\rho}^{-} = 1009{,}8\ \mathrm{kg/m^3}$ oraz $\bar{\rho}^{+} = 1366{,}2\ \mathrm{kg/m^3}$ – odchylenie $w_{\%} = 15\%$



Rys. 6.13. Przebieg zmian naprężeń zredukowanych $\bar{\sigma}_{red}$ oraz grubości ścianki $\bar{h}(t)$ w funkcji czasu oraz ubytku ścianki, przy założeniu granicznych gęstości mieszaniny $\bar{\rho}^{-} = 950{,}4\ \mathrm{kg/m^3}$ oraz $\bar{\rho}^{+} = 1425{,}6\ \mathrm{kg/m^3}$ – odchylenie $w_{\%} = 20\%$

Tablica 6.6. Zestawienie granicznych wartości czasów osiągnięcia granicy plastyczności w ściankach rury (w odniesieniu do $\bar{\rho}$) w zależności od procentowego odchylenia gęstości mieszaniny od wartości średniej $\Delta\rho_{\%}$

zmienne	$\Delta\rho_{5\%}$	$\Delta\rho_{10\%}$	$\Delta\rho_{15\%}$	$\Delta\rho_{20\%}$
t_{min} (rok)	4,7	4,65	4,6	4,55
t_{max} (rok)	4,9	5,0	5,1	5,2

6.5. Analiza wyników badań

Na podstawie wyznaczonych wartości granicznych czasu osiągnięcia granicy plastyczności w ściankach rury oraz wartości średniej czasu pokazanej na rysunku 6.1, zostały wyznaczone procentowe udziały odchylenia czasu uszkodzenia ścianek od wartości średniej. Wartości przyrostów czasu obliczano posługując się zmodyfikowanymi zależnościami (6.1)÷(6.3). Jako wartość średnią przyjęto w przybliżeniu t_0 = 4,8 roku (por. Rozdział 6.1).

$$\Delta t = (t^+ - t^-)/2 \tag{6.6}$$

$$t_{\%} = \Delta t \cdot 100/t_0 \tag{6.7}$$

gdzie Δt jest odchyleniem czasu od wartości średniej, $t_{\%}$ jest procentem odchylenia czasu od wartości średniej. Wyniki obliczeń zostały zestawione w Tablicach 6.7÷6.9.

Tablica 6.7. Zestawienie procentowego odchylenia czasu uszkodzenia ścianek przy zmiennej prędkości ubytku ścianek rurociągu $\bar{v}_u$ (pozostałe parametry ustalone) od wartości średniej czasu jego uszkodzenia t_0 = 4,8 roku

zmienna	$\Delta v_{u,5\%}$	$\Delta v_{u,10\%}$	$\Delta v_{u,15\%}$	$\Delta v_{u,20\%}$
$t_{\%}$ (%)	6,3	11,5	16,7	22,9

Tablica 6.8. Zestawienie procentowego odchylenia czasu uszkodzenia ścianek przy zmiennym ciśnieniu mieszaniny $\bar{p}$ (pozostałe parametry ustalone) od wartości średniej czasu jego uszkodzenia t_0 = 4,8 roku

zmienna	$\Delta p_{5\%}$	$\Delta p_{10\%}$	$\Delta p_{15\%}$	$\Delta p_{20\%}$
$t_{\%}$ (%)	0,5	1,0	1,6	2,1

Tablica 6.9. Zestawienie procentowego odchylenia czasu uszkodzenia ścianek przy zmiennej gęstości mieszaniny $\overline{\rho}$ (pozostałe parametry ustalone) w rurociągu od wartości średniej czasu jego uszkodzenia t_0 = 4,8 roku

zmienna	$\Delta\rho_{5\%}$	$\Delta\rho_{10\%}$	$\Delta\rho_{15\%}$	$\Delta\rho_{20\%}$
$t_{\%}$ (%)	2,1	3,6	5,2	6,8

Analiza wrażliwości rur stalowych do transportu materiałów poflotacyjnych bazująca na ocenie wyników przedstawionych w Tablicach 6.7÷6.9 pokazuje, że najbardziej istotnym parametrem wpływającym na trwałość rurociągu jest prędkość ubytku ścianek rury. W przypadku tego parametru, analizując wartości odchyleń od wartości średniej w przedziałach 5÷20%, w przypadku prędkości ubytku ścianek rurociągu odchylenie czasu od wartości średniej zmieniało się w granicach 6,3÷22,9%. W przypadku pozostałych zmiennych graniczne wartości nie przekraczały 7%. W przypadku ciśnienia maksymalne odchylenia czasu osiągnięcia granicy plastyczności wynosiło 2,1%, natomiast w przypadku gęstości około 6,8%.

7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Po analizie awarii infrastruktury technicznej odpadów poflotacyjnych, tj. instalacji dla hydrotransportu, które miały miejsce w rejonie Obiektu Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych OUOW Żelazny Most w KGHM Polska Miedź S.A., w Oddziałach Eksploatacji Zakładu Hydrotechnicznego w latach 2018÷2023, oraz po przeprowadzeniu badań terenowych można wymienić przyczyny awarii.

Do głównych przyczyn powstawania awarii należy selektywna korozja spawów, zarówno na połączeniach rur, jak również przy szwach wzdłużnych poszczególnych sztang oraz bardzo duża ścieralność ścianek rurociągów stalowych, jak również niewłaściwy, zmieniany układ statyczny, który jest wynikiem braku podpór bądź wzrostem ciśnień.

W Oddziale Zakładu Hydrotechnicznego KGHM Polska Miedź S.A. do hydrotransportu odpadów poflotacyjnych, do niedawna, były stosowane wyłącznie rury stalowe. Obecnie stosuje się rury oraz armaturę technologiczną (np. pompy, zasuwy, przepustnice) wykonane z materiałów bardziej odpornych na ścieralność oraz korozję, w których zawartość chlorków i siarczanów jest na poziomie ok. 100 000 mg/l.

Do najczęstszych skutków awarii zalicza się:

- rozerwanie rur stalowych na skutek pęknięcia spawów na szwie łączącym rury stalowe (Fot. 5.1, 5.3, 5.4,) bądź na połączeniach spawanych, spowodowane korozją lub wadliwym wykonaniem rury,
- liczne skorodowane połączenia kołnierzowe (Fot. 5.1),
- wady spawalnicze, m.in. przyklejenia, żużle (Fot. 5.2, Fot. 5.9),
- wzrosty ciśnienia w rurociągu, powodujące pęknięcia spawów (Fot.5.5) i rozerwanie ścianki rurociągu (Fot. 5.4),
- korozja wżerowa spoin (Fot. 5.9),
- korozja wżerowa w ściance rurociągu, powodująca powstanie dziur w rurociągu (Fot. 5.9),
- wycieki punktowe spowodowane korozją, brakiem przetopu, wadliwie wykonanym spawaniem (Fot. 5.9, Fot. 5.10),
- korozja w dolnej części rurociągów magistralnych w sieci technologicznej,
- zniszczone podpory stałe i przesuwne,

–brak podpór stałych na załamaniach instalacji technologicznej.

Analiza przyczyn wystąpienia awarii wymusza konieczność stosowania nowych rozwiązań technicznych podczas hydrotransportu odpadów poflotacyjnych na OUOW Żelazny Most. Poniżej przedstawiono możliwe do stosowania rozwiązania:

–zastosowanie bardziej odpornych na ścieranie materiałów dla rurociągów hydrotransportu odpadów poflotacyjnych z rudy miedzi, m.in. rur stalowych z większą zawartością: manganu, krzemu, fosforu, siarki, chromu, molibdenu, niklu, aluminium, miedzi, tytanu, wanadu, rur stalowych ze stali nierdzewnej,

–zastosowanie na armaturę technologiczną materiałów odpornych na korozję, np. np.: duplex 1.4462, superduplex 1.4410, charakteryzujących się wysoką odpornością na korozję,

– zastosowanie w rurach stalowych wykładzin wewnętrznych np. poliuretanowych, ceramicznych, zastosowanie powłok gumowych w rurach ze stali nierdzewnych, trudnościeralnych,

–dostosowanie istniejącego układu technologicznego sieci do zwiększonych obecnie ciśnień poprzez modernizację istniejących podpór bądź wybudowanie nowych podpór stałych na załamaniach rurociągu na trasie oraz w węzłach technologicznych, w tym wzmocnienie podpór pod istniejącymi zasuwami, pracującymi obecnie na większe ciśnienia, przebudowa podpór przesuwnych na trasie, dostosowanie do większych ciśnień podczas przesyłania odpadów poflotacyjnych, w związku ze wzrostem wysokości namywania sekcji na OUOW Żelazny Most,

–wdrożenie standaryzacji rozwiązań technicznych z uwzględnieniem m.in. zwiększonych wymagań dla doboru materiału na rurociągi technologiczne: przesyłowe, magistralne, itp.,

–sklasyfikowanie i inwentaryzacja rurociągów oraz wdrożenie odpowiedniej procedury budowy, modernizacji i remontów instalacji technologicznych.

Przedstawiając Strategię Utrzymania Ruchu SUR oraz Strategię Utrzymania Eksploatacji i Nadzoru SUEiN w hydrotransporcie odpadów poflotacyjnych rudy miedzi w KGHM Polska Miedź S.A. założono optymalne użytkowanie rurociągów, instalacji, maszyn i urządzeń w układzie technologicznym poprzez:

-mapowanie i monitorowanie instalacji hydrotransportu odpadów poflotacyjnych rud miedzi,

-badanie i monitorowanie zużycia armatury (zasuw, przepustnic, klap, itp.), w tym m.in. wrzecion, uszczelek, korpusu, wału napędowego, dysku, gniazda uszczelniającego, itp.,

-odpowiednie planowanie robót, w tym: wymian instalacji czy obracania rurociągów stalowych (będących głównym materiałem układu technologicznego), prac remontowych, napraw, prac inwestycyjnych, jak budowy, rozbudowy, modernizacje instalacji na podstawie: badania stanu technicznego zużycia ścianek rur magistralnych, zasilających, zrzutowych, namywających, oraz na podstawie zmieniających się warunków hydraulicznych płynącego medium, jego prędkości, uziarnienia, gęstości, ciśnienia panującego w układzie hydrotechnicznym,

celem podjęcia wcześniejszych procedur, aby uniknąć powstania awarii, a w konsekwencji aby ograniczyć niekorzystny wpływ na środowisko, życie ludzkie oraz ponoszenie wysokich strat produkcyjnych i finansowych.

W celu ograniczenia awarii infrastruktury technicznej odpadów poflotacyjnych w KGHM Polska Miedź S.A., zaproponowano osiem wdrożeń do Strategii Utrzymania Ruchu SUR i Strategii Utrzymania Eksploatacji i Nadzoru SUEiN (Tablica 7.1).

WDROŻENIE I – monitorowanie stanu systemów infrastruktury technicznej do transportu odpadów poflotacyjnych, a także określenie dopuszczalnego czasu eksploatacji odcinków rur, po którym należy wymienić lub obrócić zużyte segmenty w celu przedłużenia ich eksploatacji.

Przykładowe wartości parametrów pracy analizowanych w rozprawie rurociągów zestawiono w Tablicy 7.2. Pomiary rocznych zmian grubości ścianek rur tzw. prędkości ubytku grubości ścianek v_u na obwodzie analizowanych rurociągów w odniesieniu do wybranych odcinków rurociągów przeanalizowano w pracach Duszyńskiej i in. (2023, 2024a, 2024b).

Prędkości ścierania ścianek dla rurociągu R1 przedstawiono na Rys. 7.1., dla rurociągu R2 na Rys. 7.2, zaś dla rurociągu L2 na Rys. 7.3. Na rysunkach 7.1÷7.3 indeks K jest oznaczeniem opisującym rozważane odcinki rurociągu; odnosi się do losowo wybranych odcinków rurociągów zlokalizowanych pomiędzy kolejnymi kompensatorami (K_i, K_j).

Istotnymi parametrami monitorowania sieci jest prędkość ubytku grubości ścianek na obwodzie rury stalowej, czy pozostałej armatury, w tym grubość jej elementów składowych, korozyjność, trwałość, itp.

Monitoringiem należy objąć całą instalację hydrotransportu oraz instalację wodną, również tą z zastosowaniem nowych rozwiązań, do których należą m.in. rurociągi wyłożone materiałami trudnościeralnymi oraz rurociąg wykonany z rur ciśnieniowych PEHD. Ważnym jest odpowiednie zabudowanie rurociągu ciśnieniowego na sieci wraz z jego prawidłowym podparciem, w celu bezpiecznej pracy całego układu hydrotransportu odpadów poflotacyjnych.

Tablica 7.1.
Zestawienie opracowanego programu opartego na optymalizacji Strategii Utrzymania Ruchu SUR oraz Strategii Utrzymania, Eksploatacji i Nadzoru SUEiN dla hydrotransportu odpadów poflotacyjnych w KGHM Polska Miedź S.A.

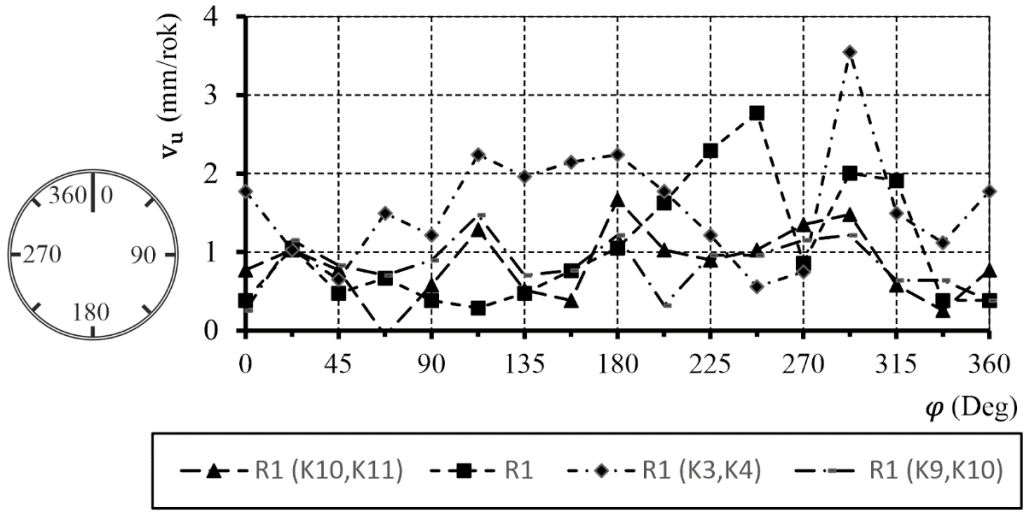
WDROŻENIE	Charakterystyka wdrożenia
I	Monitorowanie stanu systemów infrastruktury technicznej do transportu odpadów poflotacyjnych, a także określenie dopuszczalnego czasu eksploatacji odcinków rur, po którym należy wymienić lub obrócić zużyte segmenty w celu przedłużenia ich eksploatacji.
II	Mapowanie korozji rurociągów i armatury na sieci technologicznej, tj. rur, zasuw, przepustnic, kompensatorów stalowych, itp., poprzez wykonanie badań ultradźwiękowych oraz wykorzystanie robotów, kamer i sond.
III	Zwiększenie częstotliwości zmiany położenia (obracania) rurociągów stalowych i wymian rurociągów przesyłowych, magistralnych na ciśnieniowych sieciach technologicznych.
IV	Ustalanie dokładnej lokalizacji wycieków, przesiąków na rurociągach przesyłowych i magistralnych poprzez zastosowanie dokładnego opomiarowania rurociągu i pozostałej instalacji, zabudowując na sieci armaturę kontrolno-pomiarową, m.in. przetworniki ciśnienia, przetworniki emisji akustycznej, sygnalizujące w czasie rzeczywistym o stanie danej sieci przesyłowej i armatury technologicznej. Wykorzystanie systemu automatyki wraz ze zintegrowanym systemem wykrywania i lokalizacji rozszczelnień rurociągu i pozostałej armatury zabudowanej na sieci technologicznej.
V	Zastosowanie nowych materiałów – bardziej odpornych na dużą ścieralność ścianek rur oraz na korozję.
VI	Wprowadzenie bardziej restrykcyjnych wymogów odbiorowych prac remontowych, naprawczych, inwestycyjnych, w tym wymian instalacji na sieciach technologicznych.
VII	Prognozowanie zmęczenia materiałowego instalacji w wyniku wahań ciśnienia w układzie technologicznym.
VIII	Stosowanie nowoczesnych rozwiązań technicznych dla instalacji technologicznej sieci hydrotransportu, w tym m.in. w komorach, węzłach i na załamaniach sieci.

Należy również uwzględnić monitoring panujących w układzie warunków technicznych, takich jak: ciśnienie, prędkości, przepływy, poprzez zabudowanie większej liczby armatury pomiarowo-przepływowej, o większej dokładności, do której należą przepływomierze, ciśnieniomierze oraz różnego typu czujniki na sieciach ciśnieniowych.

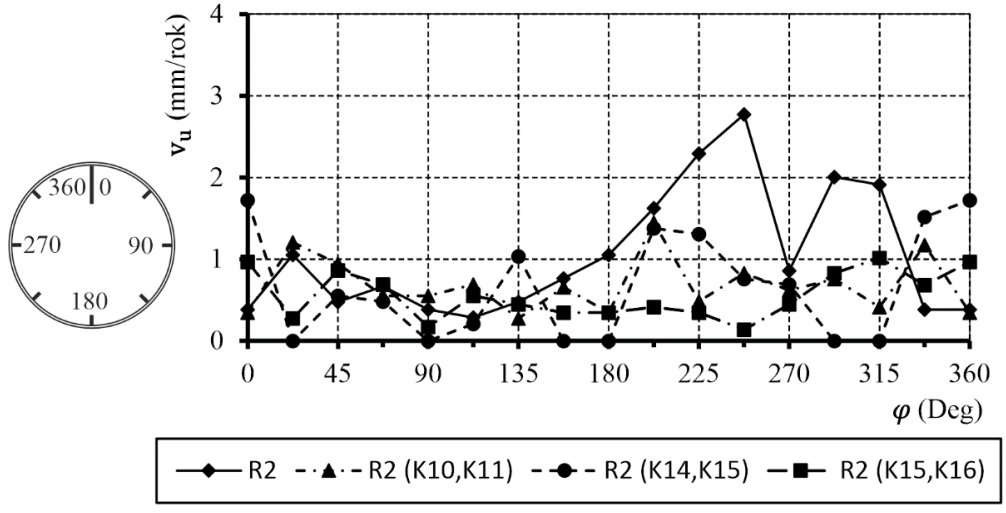
W przypadku zaobserwowania większych ciśnień, turbulencji, kawitacji lub innych zaburzeń w infrastrukturze technicznej, należy odpowiednio zareagować.

Tablica 7.2. Parametry analizowanych rurociągów odpadów poflotacyjnych R1, R2 i L2

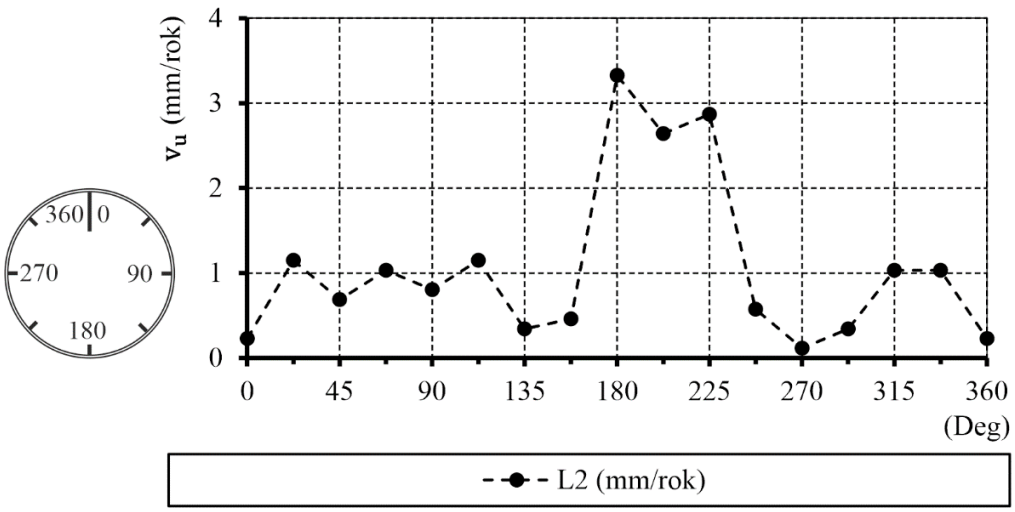
Parametr	Rurociąg R1	Rurociąg R2	Rurociąg L2
Średnica rurociągu, D_n [mm]	1000	1000	800
Zakres zmian ciśnienia operacyjnego na różnych odcinkach rurociągu [at]	$\bar{p} = \langle 5{,}12 \rangle$	$\bar{p} = \langle 5{,}12 \rangle$	$\bar{p} = \langle 5{,}14 \rangle$
Grubość początkowa ścianki, h_{w0} [mm]	16	16	16



Rys. 7.1. Prędkość ścierania ścianek v_u rurociągu R1 o średnicy 1000 mm



Rys. 7.2. Prędkość ścierania ścianek v_u rurociągu R2 o średnicy 1000 mm



Rys. 7.3. Prędkość ścierania ścianek v_u rurociągu L2 o średnicy 800 mm

WDROŻENIE II – mapowanie korozji rurociągów i armatury na sieci technologicznej, tj. zasuw, przepustnic, kompensatorów stalowych, itp., poprzez wykonanie badań ultradźwiękowych dla instalacji technicznej oraz wykorzystanie robotów, kamer i sond do obserwacji zmieniających się m.in.:

- grubości ścianek rury i armatury, w tym poszczególnych jej elementów: wału, tulei, trzpienia, łożyska, przy zabudowanych m.in. zasuwach, przepustnicach, klapach, itp.
- występowania korozji, wżerów na rurociągu i armaturze.

Wykonanie badań ultradźwiękowych umożliwia analizę zużycia sieci instalacji na podstawie fal akustycznych. Stosowanie robotów, kamer i sond – zaprogramowanych do tego typu projektów, również z możliwością stosowania w rurociągach podziemnych, jest wykorzystywane w Stanach Zjednoczonych, dzięki którym powstały następujące modele: Smart, Pigging Services, Intelligent Pig-ARAS, Ultrasonic Smart Pigs for Pipelines. Umożliwiają mapowanie stanu wewnątrz instalacji, w tym stanu korozji wewnątrz sieci.

Zastosowanie badań ultradźwiękowych według opracowanej indywidualnej instalacji, czego przykładem może być opracowana instalacja o nazwie „IBUS-TD" (2007), wykorzystywanych do okresowego monitorowania stanu występujących nieciągłości pracujących rurociągów, pozwala na diagnostykę i monitorowanie występujących korozji bądź osadów w pracujących instalacjach technologicznych.

Analiza wyników mapowania korozji instalacji umożliwia wyciągnięcie odpowiednich wniosków zapobiegających awarii, jak również umożliwia zastosowanie w odpowiednim czasie rozwiązań zapobiegających awarii, takich jak:

- wymiana rurociągu, wymiana armatury,
- wykonanie prac remontowych, naprawczych poprzez m.in. wyłożenie wnętrza instalacji materiałami trudnościeralnymi, jak np.: PUR (poliuretan), DENSIT (wykładzina betonowa), wykładziną ceramiczną lub gumową, wykładziną ze stali nierdzewnej, trudnościeralnej, dodatkowo z powłoką wewnętrzną z węglików chromu, itp., a tym samym wydłużenie żywotności bezawaryjnej układu ciśnieniowego hydrotransportu odpadów poflotacyjnych.

WDROŻENIE III – zwiększenie częstotliwości zmiany położenia (obracania) rurociągów stalowych i wymian rurociągów przesyłowych, magistralnych na ciśnieniowych sieciach technologicznych.

Z badań numerycznych opublikowanych w pracach Duszyńskiej i in. (2023, 2024a, 2024b) wynika, że proces degradacji instalacji spowodowany transportem różnych mediów, jest zależny od wielu czynników, takich jak prędkość przepływu, typ i charakterystyka transportowanego medium, w tym od rozmiaru i kształtu transportowanych ziaren.

W Rozdziale 6 niniejszej rozprawy oraz w pracach Duszyńskiej i in. (2023, 2024a, 2024b) przedstawiono prognozę czasu wystąpienia pierwszej awarii rurociągu, którą określono na okres <3, 4> lat. Po tym czasie, rury powinny zostać obrócone i poddane kolejnemu cyklowi eksploatacji. Szacunkowa całkowita trwałość systemów orurowania, tzw. przedział czasu, w którym rury przy pewnych warunkach i minimalnym obciążeniu mogą bezpiecznie pracować, wynosi <6, 8> lat.

W związku z powyższym zaleca się obracanie odcinków rury z większą częstotliwością, ale z mniejszą wartością kąta, np. co 30°−45° (najlepiej co druga/trzecia rura) w kierunkach przeciwnych.

Średni czas uszkodzenia elementu wynosi 4,8 roku przy następujących założeniach: granicznej prędkości ubytku ścianki 2,53 mm/rok, ciśnieniu działającym na ścianki rury 8,5 at oraz granicznej wartości gęstości mieszaniny 1188 kg/m^3.

Czas uszkodzenia ścianek rurociągu jest zależny od prędkości ubytku grubości ścianek rury. Zmiana prędkości ubytku ścianki rury ma bardzo duży wpływ na czas osiągnięcia granicznych wartości naprężeń zredukowanych w ściance rury, jak również na czas, po którym zostaje osiągnięta krytyczna grubość ścianki, przy której dochodzi do osiągnięcia wytrzymałości stali. Wnioski z analiz zostały przedstawione w Tablicach 6.4÷6.9 w Rozdziale 6.

WDROŻENIE IV – ustalanie dokładnej lokalizacji wycieków, przesiąków na rurociągach przesyłowych i armaturze poprzez zastosowanie dokładnego opomiarowania rurociągu
i pozostałej instalacji, zabudowując na sieci armaturę kontrolno-pomiarową m.in. przetworniki ciśnienia, przetworniki emisji akustycznej, sygnalizujące w czasie rzeczywistym sygnały o stanie danej sieci przesyłowej oraz armatury technologicznej.

Głównym celem tego wdrożenia jest opracowanie systemu identyfikacji nieszczelności, celem szybkiego wykrywania wycieków i ich lokalizacji, zapobiegając w ten sposób awarii. Działanie systemu wykorzystuje metodę opartą na precyzyjnym pomiarze ciśnienia dynamicznego wspartą pomiarami emisji akustycznej. Zaleca się zebranie wszystkich danych do Centralnego Rejestru Danych CRD, a następnie zarządzanie oraz bezpieczne kontrolowanie sieci technologicznej. Program może uwzględniać również wykorzystanie sztucznej inteligencji do wykrywania wycieków na sieci.

WDROŻENIE V – zastosowanie nowych, lepszych materiałów, tj. bardziej odpornych na ścieralność ścianek i na korozję rur, jak również zrezygnowanie ze stosowania rur stalowych L235 o składzie chemicznym: C = 0,16%; Mn = 0,63 %; Si = 0,20%; P = 0,012%; S = 0,003%; Al = 0,032%, jako materiału dla rurociągów magistralnych, przesyłowych hydrotransportu odpadów poflotacyjnych.

Z uwagi na dużą ścieralność rur stalowych L235, transportowane w nich odpady poflotacyjne przyczyniają się do wytarcia stali i powstania zagrożenia wycieków oraz pęknięć lokalnych, wzdłużnych lub obwodowych, wpływając na pojawienie się awarii instalacji.

Dla rurociągów przesyłowych, magistralnych proponuje się stosowanie materiału bardziej odpornego na ścieranie, tj.:

- rur stalowych o podwyższonej odporności chemicznej, jak również z większą zawartością składników odpornych na ścieranie, powyżej maksymalnej granicy normowej zawartości m.in.: manganu, krzemu, fosforu, siarki, chromu, molibdenu, niklu, aluminium, miedzi, tytanu,
- stali nierdzewnej, cechującej się wysoką odpornością na korozję oraz podatną na spawanie,

- rur stalowych ciśnieniowych ze stali trudnościeralnych z dodatkowym zabezpieczeniem, np. powłokami, malowaniem, cynkowaniem, stalą wysokochromową lub rur z innej stali nierdzewnej, np. super duplex lub duplex z wewnętrzną wykładziną z poliuretanu o grubości minimum 10 mm,
- wykładzin trudnościeralnych typu DENSIT lub wykładzin ceramicznych, poliuretanowych m.in. PUGA® wewnątrz rur stalowych, które znacznie zmniejszają zjawisko ścieralności i korozji, wpływając na wydłużenie żywotności rurociągu technologicznego,
- wykładzin z powłoki na bazie ceramicznej żywicy epoksydowej o wysokiej wytrzymałości, np. wykładzin rur ECW (www.condukmin.com).

WDROŻENIE VI – wprowadzenie zwiększonych wymogów odbiorowych prac remontowych, naprawczych, inwestycyjnych, w tym wymian instalacji na sieciach technologicznych (por. Zał. 3 – Tablice Z.3.1÷ Z.3.8).

Jednocześnie zaleca się stosowanie programu standaryzacji rozwiązań technicznych z uwzględnieniem:

- zwiększonych wymagań technicznych dla właściwego doboru materiału na rurociągi przesyłowe, ciśnieniowe,
- odpowiedniego sklasyfikowania rurociągów oraz armatury technologicznej,
- inwentaryzacji rurociągów, armatury, maszyn,
- wdrożenia odpowiedniej procedury budowy, modernizacji, odbioru prac i remontów instalacji technologicznych,
- wdrożenia odpowiedniej procedury: eksploatacji, monitorowania, wprowadzania danych technicznych do stworzonego w ramach rozprawy Centralnego Rejestru Danych CRD (por. Zał. Z3), w celu skutecznego kontrolowania całej infrastruktury technicznej hydrotransportu odpadów poflotacyjnych z rudy miedzi.

Aby ograniczyć awarie w układzie technologicznym KGHM Polska Miedź S.A. zaleca się:

- zwiększenie wymagań jakościowych dla materiałów na rurociągi i armaturę technologiczną, zgodnie z zaproponowanymi powyżej zaleceniami,
- stosowanie najwyższej klasy spoin spawanych – poziom jakości B, zgodnie z obowiązującą normą PN-EN ISO 5817:2023-08,
- stosowanie wyższych wymogów technicznych dotyczących jakości wykonawstwa robót, oraz zwiększenie wymogów prac odbiorowych, tj.:

- bezwzględne wykonywanie prac spawalniczych przez osoby z aktualnymi uprawnieniami do spawania rurociągów stalowych przesyłowych i ciśnieniowych, posiadające odpowiednie kwalifikacje i aktualną książkę spawacza,
- przeprowadzenie i sporządzenie protokołu z badań ultradźwiękowych UT co najmniej dla 50% jednorazowo wykonywanego odcinka prac,
- szczegółowa liczba i procedura (metodyka) przeprowadzania wymaganych badań ultradźwiękowych UT powinna być wykonana zgodnie z aktualną normą PN-EN 17640:2019-01,
- konieczność stosowania odpowiedniej dokumentacji spawalniczej.

Dokumentacja spawalnicza obejmuje:

- instrukcję technologiczną spawania WPS, która zawiera dane techniczne dotyczące prawidłowego wykonania danej spoiny, w tym parametry spawania, rodzaj materiału, rodzaj i wymiary spoiny, rodzaj używanego spoiwa, strumień gazu osłonowego, prąd elektryczny, napięcie, prędkość spawania oraz zalecenia metody pracy, odpowiada za prawidłowość wykonania złącza spawanego, wpływa na zmniejszenie awarii infrastruktury technicznej,
- protokół uznania technologii spawania WPQR, który obejmuje dokumentację oraz wyniki badań potwierdzających, że Wykonawca prac spawalniczych posiada uprawnienia, doświadczenie oraz wiedzę w wykonaniu złącz, prac spawalniczych. Protokół WPQR obejmuje również szczegóły dotyczące metody spawania Wykonawcy, rodzaj złącza, parametry spawania, rodzaj materiału oraz wyniki badań nieniszczących i niszczących,
- instrukcję kontroli prowadzonych prac spawalniczych,
- protokoły badań jakości złączy spawanych,
- dziennik spawania (karta spawacza) wraz z podpisami uprawnionych spawaczy realizujących każdorazowe połączenia spawane wraz z odpowiednią ich identyfikacją, opisem na wymienianym, modernizowanym rurociągu.

WDROŻENIE VII – prognozowanie zmęczenia materiałowego instalacji w wyniku wahań ciśnienia w układzie technologicznym.

Efekt zmęczenia materiałowego, związany z eksploatacją całego układu hydrotransportu odpadów poflotacyjnych, został przeanalizowany i opisany w Rozdziale

5 rozprawy. Wnioski z analiz zmęczeniowych zostały również przedstawione w pracach Duszyńskiej i in. (2023, 2024a, 2024b). Poniżej przedstawiono najważniejsze z nich:

- porównując pracę rurociągów o charakterze zużycia mieszanym i jednorodnym, o tych samych minimalnych grubościach ścianek, wartości maksymalnej obwodowej siły niszczącej są zbliżone, ale w odniesieniu do zużycia o charakterze mieszanym są uzyskiwane przy znacznie mniejszych całkowitych obwodowych przemieszczeniach w płaszczu rury. Efekt ten jest wynikiem powstawania odkształceń na niewielkim, w porównaniu do obwodu rurociągu, przewężeniu wynikającym z lokalnego oddziaływania transportowanej mieszaniny,
- efekt związany z wpływem mimośrodu oddziaływania siły obwodowej na naprężenie maksymalne na krawędzi lokalnego ubytku jest istotny jedynie w zakresie odkształceń sprężystych. Przy dużych plastycznych odkształceniach różnice w wielkościach maksymalnych naprężeń rozciągających w przypadku jednorodnego i lokalnego charakteru ubytków jest wobec znacznej ciągliwości materiału mało istotny,
- ustalenie ewentualnego kryterium bezpiecznej pracy w postaci oceny wydłużenia obwodu rury albo jej ugięć będzie zależny od proporcji długości strefy, na którym ma miejsce jednorodne zużycie rury do długości obszaru, na którym występują ubytki spowodowane lokalnym oddziaływaniem transportowanej mieszanki. Różnica całkowitych granicznych przemieszczeń obwodowych, dla których dochodzi do rozerwania blachy, może być bardzo duża.

WDROŻENIE VIII – stosowanie nowoczesnych rozwiązań technicznych dla instalacji technologicznej sieci hydrotransportu, w tym m.in. w komorach, węzłach i na załamaniach sieci.

W przypadku standaryzacji instalacji technologicznej, dla osiągnięcia korzyści w postaci ograniczenia awarii instalacji istotne są następujące działania:

- dostosowanie remontu i modernizacji istniejących podpór stałych i przesuwnych do zwiększonych ciśnień w układzie,
- zastosowanie na układach technologicznych, bezwzględnie na wszystkich załamaniach, podpór stałych narożnych,

- stosowanie w komorach i węzłach, bezwzględnie przy armaturze, m.in. przy zasuwach odcinających, podpór stałych oraz przy przejściach przez ściany komór łańcuchów uszczelniających,
- stosowanie kompensatorów stalowych i kompensatorów gumowych z sygnalizacją zużycia się materiału w celu kompensowania się przemieszczeń oraz zastosowanie podpór stałych w rejonie tych kompensatorów, mających za zadanie przejęcie działających sił podłużnych i poprzecznych w układzie,
- redukcja masy rury magistralnej i zmniejszenie średnicy kolektora, w zależności od etapu udostępnienia frontu pracy instalacji technologicznej i zrzutu odpadów na OUOW (Duszyńska i in., 2021),
- zastosowanie w instalacjach transportujących odpady poflotacyjne z rudy miedzi wewnętrznych okładzin poliuretanowych, odznaczających się gładką powierzchnią o dobrych właściwościach ślizgowych, w celu zminimalizowania prędkości ubytków grubości ścianek na obwodzie rurociągu, powstających podczas przepływu transportowanego medium,
- zmiana dotychczasowego sposobu łączenia rur poprzez zastosowanie uszczelki, która jest integralną częścią wykładziny wewnętrznej, w celu otrzymania skuteczniejszej szczelności połączenia,
- stosowanie długich tulei kołnierzowych, zapewniających skuteczne połączenie ciśnieniowej instalacji. Zaleca się stosowanie tych tulei dla połączeń różnych materiałów (np. połączenie rur stalowych z rurami z PEHD), które pod wpływem zmiennych warunków atmosferycznych charakteryzują się dużą rozszerzalnością cieplną, odkształcają się, tj. wydłużają się w okresie letnim i kurczą w okresie zimowym,
- stosowanie nierdzewnych stalowych kołnierzy z długą szyjką, zapewniających szczelność połączenia i bezpieczny, prawidłowo wykonany montaż instalacji ciśnieniowej, w szczególności w rejonach ścian komór podziemnych i przy węzłach naziemnych.

Analizując dostępne na świecie rozwiązania stosowania innowacji technicznych na sieciach technologicznych należy wymienić innowacje, m.in. firmy QuakeWrap, która opracowała naprawę rurociągów przy użyciu technologii materiałowej i automatyzacji.

Do napraw i remontów infrastruktury technicznej stosuje się:

- kompozyty i materiały polimerowe odporne na korozję i agresywne środowisko chemiczne, wykorzystując do nakładania ich wewnątrz instalacji zautomatyzowane systemy, które w krótkim czasie eliminują wyciek,
- zabudowanie automatycznych sensorów do kontroli stanu naprawionych miejsc w rurociągu.

Stosowanie powyższych rozwiązań jest możliwe w różnych warunkach terenowych hydrotransportu i dotyczy realizacji prac zarówno w rurociągach podziemnych, naziemnych, jak również w rurociągach zbudowanych z różnych materiałów, np. ze stali, z rur PEHD.

Metody naprawcze w powyższych technologiach są następujące (www.quakewrap.com.au; www.volpe.dot.gov):

- SuperLaminate - wewnątrz rury za pomocą worka zamocowanego na robocie jest transportowany materiał (laminat), który w kolejnym etapie jest wprasowany do ścianki rury i utwardzony poprzez grzanie,
- PipeMedic – metoda jest wykorzystywana dla różnych średnic rurociągów, stosuje się różnego rodzaje laminaty,
- StifPipe – technologia polegająca na produkcji rur pokrytych lekkim rdzeniem FRP (polimeru wzmocnionego włóknem szklanym), tworząc rurę odporną na obciążenia zewnętrzne i wewnętrzne,
- InfinitPipe - stosowana do produkcji rury FRP bez spawów; produkcja odbywa się na placu budowy, bez ograniczeń długości, bez połączeń.

Ciekawym rozwiązaniem technicznym jest opracowanie standaryzacji urządzenia, tzw. bezzałogowych systemów powietrznych, dronów lub śmigłowców do wykonywania inspekcji technicznych, monitorowania, mapowania sieci.

Niewątpliwie, użycie bezzałogowych systemów powietrznych wpłynie na skuteczne i systemowe kontrolowanie całej infrastruktury technicznej, często rozprzestrzeniającej się na tysiące kilometrów po terenie, gdzie człowiek nie jest w stanie skutecznie monitorować cały układ techniczny.

Centralne Rejestry Danych pozwalają na ciągłe monitorowanie zabudowanych na sieciach wskazań czujników. W centrach przeszkolony personel stale obserwuje operacje na systemach komputerowych, monitorując szczegółowo ciśnienie, przepływ i objętość medium w rurociągu, aby szybko reagować na awarie sieci, sprzętu, wszelkiego typu wycieki lub inne nietypowe działania wzdłuż rurociągu bądź armatury.

Ponadto, pracownicy są przeszkoleni w zakresie wyłączania systemów, jeśli podejrzewają wyciek i nie uruchamiają ponownie rurociągu, dopóki nie stwierdzą, że rurociąg jest bezpieczny. Systemy alarmowe automatycznie powiadamiają również operatorów dyspozytorni o konieczności podjęcia działań w przypadku nieprawidłowych odczytów z czujników ciśnienia wzdłuż rurociągu czy armatury. Sterownie rurociągów monitorują wskaźniki bezpieczeństwa, takie jak zmiany ciśnienia, przepływu i objętości wzdłuż rurociągu. Operatorzy przechowują również dane historyczne o każdym rurociągu, urządzeniu, armaturze, o tym, z jakiego rodzaju stali bądź innego materiału został wykonany, kto go wyprodukował, jakie powłoki zostały użyte i jakie medium (scharakteryzowane takimi parametrami, jak: prędkość, gęstość, ciśnienie, przepływ, itp.) przez niego przepływało w danym czasie. Są to informacje, które wykorzystuje się do zarządzania i utrzymywania integralności rurociągu.

Kolejnym przykładem stosowania zaawansowanych technologii, m.in. w Stanach Zjednoczonych, jest urządzenie do badania wnętrza rurociągu poprzez skanowanie i pomiary grubości ścianek rurociągu. Specjalne urządzenia są umieszczane wewnątrz rurociągu i przemieszczają się w nim, skanując i mierząc ścianki rury w poszukiwaniu wszelkiego typu wgnieceń, korozji lub pęknięć. Uzyskane dane są następnie analizowane w celu zdiagnozowania problemów i zaplanowania konserwacji zapobiegawczej lub napraw.

Niewątpliwie do zaawansowanych rozwiązań technicznych można zaliczyć stosowanie technik ochrony rur stalowych przed korozją zewnętrzną. Gdy stal jest wystawiona na działanie tlenu lub wody to zewnętrzna strona rury może ulegać procesowi korozji. Wobec tego stosuje się zaawansowane materiały powłokowe do ochrony zewnętrznej i wewnętrznej części rury przed korozją, jak również ochronę katodową zabudowanej pod powierzchnią terenu rury. Powłoka i ochrona katodowa pomagają w sposób ciągły chronić integralność rurociągu. Obecność materiałów ścieralnych w produktach przeróbki rudy miedzi w procesie chemicznym przebiegającym na flotacji w Zakładach Wzbogacania Rud ZWR w KGHM Polska Miedź S.A. powoduje korozję wnętrza ścianki rury. Korzystne jest zastosowanie inhibitorów korozji, aby zapobiec korozji wewnętrznej oraz odpowiedniego urządzenia do czyszczenia, usuwania zanieczyszczeń z rurociągu, w celu zapobiegania korozji wewnętrznej.

Reasumując, należy zaznaczyć, że zawarta w rozprawie propozycja wdrożeń rozwiązań technicznych w celu ograniczenia awarii infrastruktury technicznej odpadów poflotacyjnych z flotacji rudy miedzi w KGHM Polska Miedź S.A., wpisuje się w Strategię Utrzymania Ruchu SUR oraz w Strategię Utrzymania Eksploatacji i Nadzoru SUEiN. Można z całą pewnością stwierdzić, że proponowany program znacząco wpłynie na ograniczenie wystąpienia awarii na sieci technologicznej, przyczyniając się do bezpieczeństwa ludzi, chroniąc środowisko oraz zachowując ciągłość produkcji miedzi w Polsce, przy jednoczesnej eliminacji dużych strat technicznych i finansowych, występujących w przypadku powstania awarii oraz znacząco ograniczy nieplanowane przestoje technologiczne.

Jednocześnie, z uwagi na coraz częstsze wykorzystanie sztucznej inteligencji w różnych gałęziach gospodarki, zaleca się również stosowanie jej w szerokim spektrum działania technologicznego, m.in. do wykrywania wycieków, monitorowania sieci technologicznej, czyli do zapobiegania awariom infrastruktury technicznej.

Można z całym przekonaniem stwierdzić, że w celu uzyskania najwyższej jakości pracy infrastruktury technicznej KGHM Polska Miedź S.A. tłoczącej odpady poflotacyjne z rudy miedzi, a tym samym w celu zminimalizowania przyczyn awarii, koniecznym jest wdrożenie opisanego w rozprawie programu.

PODZIĘKOWANIA

Dyrekcji KGHM Polska Miedź S.A. Oddział Zakład Hydrotechniczny, Dyrektorowi Naczelnemu mgr inż. Pawłowi Piwowarowi, Dyrektorowi Technicznemu mgr inż. Mirosławowi Kidoniowi oraz w szczególności Dyrektorom mgr inż. Markowi Adamek i mgr inż. Przemysławowi Nowak serdecznie dziękuję za udostępnienie danych archiwalnych z KGHM Polska Miedź S.A. Oddział Zakład Hydrotechniczny, w tym rysunków i danych z monitoringu dotyczących awarii infrastruktury technicznej Obiektu Unieszkodliwiania Obiektów Wydobywczych OUOW Żelazny Most.

Dziękuję również Panu dr inż. Pawłowi Stefankowi za merytoryczne uwagi i konsultacje podczas realizacji rozprawy doktorskiej.

Słowa wdzięczności kieruję do Kolegów z Oddziału Hydrotransportu Odpadów Oddziału Eksploatacji OUOW, Oddziału Gospodarki Wodą i Szefa Kompleksu Hydrotechnicznego za cenne uwagi dotyczące wdrażania różnych wariantów rozwiązań technicznych mających na celu ograniczenie powstawania awarii infrastruktury technicznej odpadów poflotacyjnych z flotacji rudy miedzi w KGHM Polska Miedź S.A.

KGHM Polska Miedź
Spółka Akcyjna
z siedzibą w Lubinie

Oddział
Zakład Hydrotechniczny
ul. Polkowicka 52
59-305 Rudna
zh.sekretariat@kghm.com

tel.: (48 76) 747 93 11
fax: (48 76) 747 93 90

www.kghm.com

NIP 692-000-00-13
REGON 390021764-00103
BDO 000006528

Członkowie Zarządu
KGHM POLSKA MIEDŹ S.A.:

Andrzej Szydło
Prezes Zarządu

Zbigniew Bryja
Wiceprezes Zarządu
ds. Rozwoju

Piotr Krzyżewski
Wiceprezes Zarządu
ds. Finansowych

Mirosław Laskowski
Wiceprezes Zarządu
ds. Produkcji

Anna Sobieraj-Kozakiewicz
Wiceprezes Zarządu
ds. Aktywów Zagranicznych

Piotr Stryczek
Wiceprezes Zarządu
ds. Korporacyjnych

Rudna, 17 września 2025 r.

ZH.DI.HW.5596.....2025

Politechnika Śląska

ul. Akademicka 2A
44-100 Gliwice

dotyczy: wydania zgody na wykorzystanie danych należących do KGHM Polska Miedź S.A. w rozprawie doktorskiej mgr inż. Iwony Duszyńska

W odpowiedzi na pismo mgr inż. Iwony Duszyńskiej z dnia 08.08.2025 r. roku informuję, że wyrażam zgodę na:

- wykorzystanie danych należących do KGHM Polska Miedź S.A. w rozprawie doktorskiej pt. *„Ograniczenie awarii infrastruktury technicznej odpadów poflotacyjnych z flotacji rudy miedzi w KGHM Polska Miedź S.A."*

oraz

- złożenie rozprawy doktorskiej w Szkole Doktorów i do Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport na Politechnice Śląskiej.

DYREKTOR
DS. TECHNICZNO-INWESTYCYJNYCH
Mirosław Kidoń

Zarejestrowana pod nr
KRS 0000023302
w Sądzie Rejonowym
dla Wrocławia Fabrycznej,
IX Wydział Gospodarczy
Krajowego Rejestru Sądowego,
gdzie przechowywana jest
dokumentacja spółki

Kapitał zakładowy:

2.000.000.000 zł
(z czego wpłacono 2.000.000.000 zł)

BIBLIOGRAFIA

Adamek R. (1980): Podsadzanie wyrobisk górniczych, Katowice, Wydawnictwo Śląsk.

Borysiewicz M., Kowalik-Pilarska E., Siess G., Wojciechowicz H. (2020): Ocena zagrożeń środowiskowych wywoływanych przez poważne awarie przemysłowe, Rozdział VI: Badania na rzecz poprawy bezpieczeństwa w zakładach przemysłowych stwarzających zagrożenie poza swoim terenem, praca pod. red. J. Tępińskiego, B. Połcia, Wydawnictwo CNBOP-PIB, Józefów 2020.

Borysiewicz M., Potempski S. (2002): Ryzyko poważnych awarii rurociągów przesyłowych substancji niebezpiecznych. Metody oceny, pod red. Jerzego S. Michalika, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa.

Concha F. A. (2014): Solid - Liquid Separation in the Mining Industry, Fluid Mechanics And Its Applications, Wydawnictwo Springer.

Czaban S. (1988): Wyznaczanie współczynnika oporów liniowych przy przepływie reostabilnych mieszanin w rurociągach, Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu, nr 176, Melioracja XXXI, Wrocław.

Czaban S., Lewiński J., Rubaniuk A. (2007): Gospodarka wodna i hydrotransport, Monografia KGHM Polska Miedź S.A. – Lubin 2007, Rozdział: Składowiska odpadów z flotacji rud miedzi, 625-664.

Czaban S., Pratkowiecki R. (2007): Gospodarka wodno odpadowa w KGHM Polska Miedź S.A., wczoraj, dziś i jutro, Monografia 30 – lecia eksploatacji składowiska Żelazny Most 1977-2007, KGHM Polska Miedź S.A., Zakład Hydrotechniczny w Rudnej, Lubin, Rozdział: Eksploatacja i rozwój składowiska, 99-109.

Czuchryj J., Sikora S. (2009): Badania wizualne złączy spawanych, Instytut Spawalnictwa, wyd. III, Gliwice.

Davies M.P., Roberts Mc., Martin E.C. (2002): Static liquefaction of tailings – Fundamentals and Case Histories, Tailings Dams, Association of State Dam Safety Officials.

Dunikowski A., Kęska J., Klich I., Ociepa T. (1976): Hydrotransport kopalin stałych, Skrypt Uczelni, nr 535, AGH Kraków.

Duszyńska I., Krykowski T., Gremza G., Stefanek P., Bzówka J. (2024a): Zastosowanie MES do oceny degradacji rur stalowych, Materiały Budowlane, Wydawnictwo SIGMA-NOT Sp. z o.o., nr 4, 82-85.

Duszyńska I., Krykowski T., Stefanek P., Bzówka J. (2024b): Application of the interval approach to determine the exploitation time of pipelines, Archives of Civil Engineering, Polska Akademia Nauk – Instytut Podstawowych Problemów Techniki, vol. 70, nr 1, 325-335.

Duszyńska I., Krykowski T., Stefanek P., Bzówka J. (2023): Zastosowanie metod przedziałowych do oceny czasu eksploatacji rurociągów, w: Wyzwania budownictwa na terenach górniczych, pogórniczych i zdegradowanych. Księga streszczeń/Orlik-Kożdoń B., Jasiński M., Pokorska-Silva I. (red.), Politechnika Śląska, 323-324.

Duszyńska I., Stefanek P., Bzówka J. (2021): Wybrane rozwiązania ograniczające możliwość wystąpienia awarii podczas hydrotransportu odpadów poflotacyjnych w budownictwie hydrotechnicznym, w: Bezpieczeństwo budowli hydrotechnicznych/Winter J. [i in.] (red.), Seria Publikacji Naukowo-Badawczych IMGW-PIB, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy, 57-62.

Fourie A., Reid D., Russel A., Rahman M., Vinod J., Vo Thanh (2019): Static Liquefaction of Tailings: An Update on the Industry Funded TAILLIQ Research Project, Proceedings of Tailings and Mine Waste 2019, November 17-20, Vancover, Canada.

Gołębiewska A., Lipiński M.J. (2000): Miary charakteryzujące rozkład uziarnienia osadów poflotacyjnych, XII Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania, Problemy Geotechniczne Obszarów Przymorskich, Szczecin-Międzyzdroje, 18-20 maja 2000, 211-219.

Gosztowit L. (1956): Rurociągi i armatura, Państwowe Wydawnictwa Techniczne, Warszawa.

Jacobs B.E.A (1991): Design of Slurry Transport Systems, Impressum Prasa CRC.

Jarige A., Roche A., Sanyas M., Roidot J.-P. (1961): Le remblayage hydraulique aux Houilleres du Bassin de Lorraine, Revue de Industrie Minerale z. 43, nr 5.

Jaroń-Kocot M. (2004): Właściwości transportowe szybko sedymentujących hydromieszanin odpadowych w procesie ich podziemnego lokowania, Prace naukowe GIG Górnictwo i Środowisko.

Jaworowska B., Szuster A., Utrysko B. (2008): Hydraulika i hydrologia, Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, wyd. VIII.

Jewell R.J. i Fourie A.B. (2000): Paste and Thickened Tailings – A Guide. ACG Australian Centre For Geomechanics

Kempiński J., Smilgin Z. (2009): Hydrotransport osadów ściekowych, Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, nr 9, Polska Akademia Nauk, Oddział w Krakowie.

Kęska J. (1977): Badania eksperymentalne procesu hydrotransportu kopaliny rurociągami jako mieszaniny niejednorodnej, Zeszyty Naukowe Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica, nr 635, z. 95 Górnictwo, Kraków.

Kęska J. (1981): Hydrotransport kopaliny rurociągami: wybrane problemy koncentracji i metodyki badań eksperymentalnych mieszanin niejednorodnych, Zeszyty Naukowe Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, nr 809, z. 109.

Kyzas G.Z., Mitropoulos A.C., Matis K.A. (2021): From Microbubbles to Nanobubbles: Effect on Flotation, Processes 2021, 9, 1287.

Lembas S., Maślanka W. (1998): Eksploatacyjne i geotechniczne uwarunkowania składowania odpadów poflotacyjnych rud miedzi, Konferencja: XXX lat Wydziału Górniczego Politechniki Wrocławskiej, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.

Lisowski A. (1992): Metoda optymalizacji wykorzystania odpadów kopalnianych i energii potencjalnej w podsadzce hydraulicznej – metoda OG, Prace GIG, Komunikat nr 768.

Matis K.A; Mavros P. (1991): Recovery of Metals by Ion Flotation from Dilute Aqueous Solutions, Separation and Purification Methods, Vol. 20, Issue 1~~(Google Scholar).~~

Matras Z. (2001): Transport hydrauliczny reologicznie złożonych cieczy nienewtonowskich w przewodach, Politechnika Krakowska im. T. Kościuszki, Kraków.

Michalik J.S., Domański W. (2002): Program zapobiegania awariom i system zarządzania bezpieczeństwem w zakładach zwiększonego oraz dużego ryzyka poważnej awarii przemysłowej, CIOP Warszawa.

Okrajni J., Cieśla M., Renowicz D., Wojas M. (1996): Badania zmian własności mechanicznych materiału rurociągów po długotrwałej eksploatacji w podwyższonej temperaturze, Inżynieria materiałowa. wydanie 4, str. 93.

Palarski J. (1982): Hydrotransport, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.

Parzonka W. (1977): Hydrauliczne podstawy transportu rurowego mieszanin dwufazowych. Skrypt Akademii Rolniczej, Wrocław.

Paterson A.J.C. (2011): The pipeline transport of high density slurries – a historical review of past mistakes, lessons learned and current technologies, Paste 2011 – editors: R.J. Jewell & A.B. Fourie, 2011 Australian Centre for Geomechanics. Perth.

Pilarczyk J (2017): Poradnik inżyniera, Spawalnictwo, tom 1 i 2, Wydawnictwo WNT.

Raczkowski J. (1978): Reologia zaczynów uszczelniających, Skrypt uczelniany nr 612, Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica, Kraków.

Revie R.W., Uhling H.H. (2008): Corrosion and Corrosion Control, Wiley&Sons, New York.

Samolczyk J. (2005): Sporządzanie krzywej DAC (Distance Amplitude Correction) oraz ocena wad materiałowych, Obróbka Plastyczna Metali, nr 1, Materiałoznawstwo i obróbka cieplna.

Sobczykiewicz W., Urbaniak M, Sosnowski I. (2007): Bezpieczeństwo przemysłowe, t. 1, Monografia SIEMENS.

Sobota J., Kril S. (1994): Modele przepływu hydromieszanin w rurociągach, Zbiór prac: Międzynarodowa Konferencja Naukowo Techniczna - Pompy i Transport Hydrauliczny, TRANSHYDRO'94, Wrocław-Sobótka, 6-8 czerwca 1994.

Szerakowska S. (2014): Parametry kształtu ziaren oraz analityczne sposoby ich wyznaczania, Przegląd Geologiczny, vol. 62, nr 10/2.

Tschuschke W. (2006): Sondowania statyczne w odpadach poflotacyjnych, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, zeszyt 110, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.

Tschuschke W., Gogolik S., Kroll M, Walczak M. (2015): Miary zagęszczania odpadów poflotacyjnych w kontekście kryteriów odbioru robót ziemnych, Inżynieria Morska i Geotechnika 2015, Tom nr 3, 200-203, Wydawca IMOGEOR Spółka z o.o.

Tschuschke W., Skowrońska D. (2015): Oszacowanie zdolności filtracyjnych odpadów poflotacyjnych wbudowanych w zapory składowisk namywanych, Inżynieria Ekologiczna 2015, nr 44, 95-103, Wydawnictwo: Polskie Towarzystwo Inżynierii Ekologicznej.

Tukker M., Kooij K., Pothof I. (2016): Hydraulic design and management of waste water transport systems, wyd. IWA Publishing.

Vieira R.E., Mansouri A., McLaury B.S., Shirazi S.A. (2016): Experimental and computational study of erosion in elbows due to sand particles in air flow, Powder Technology, tom 288, 339-353 (ScienceDirect).

Wee S.K., Yap Y.J. (2019): CFD study of sand erosion in pipeline, Journal of Petroleum Science and Engineering, Tom 176, str. 269-278.

Wiśniewski G. (1996): Przepisy europejskie dotyczące bezpieczeństwa środowiskowego i technicznego gazowych rurociągów przesyłowych, Seminarium „Rurociągi dalekosiężne i wewnętrzne w użytkowaniu", Zakopane.

Zarzycki M., Wilk A. (1994): Zwiększenie odporności pomp do transportu hydraulicznego ciał stałych na działanie erozyjne cieczy, Zbiór prac, Międzynarodowa Konferencja Naukowo Techniczna - Pompy i Transport Hydrauliczny, TRANSHYDRO'94, Wrocław-Sobótka, 6-8 czerwca 1994.

Zienkiewicz O.C. (1972): Metoda Elementów Skończonych, Arkady, Warszawa.

USTAWY I ROZPORZĄDZENIA

Ustawa z dnia 7 lipca 1994 roku Prawo budowlane (Dz.U. 2024, poz. 725).

Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 roku Prawo ochrony środowiska (Dz.U.2001, nr 62, poz. 627).

Ustawa z dnia 10 lipca 2008 roku o odpadach wydobywczych (Dz.U. 2022, poz. 2336).

Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 roku o odpadach (Dz.U. 2023, poz. 1587, 1599, 1688, 1852, 2029).

Ustawa z dnia 20 lipca 2017 roku Prawo wodne (Dz.U.2017, poz. 1566).
Rozporządzenie Ministra Klimatu z dnia 2 stycznia 2020 roku w sprawie katalogu odpadów (Dz.U. 2020, poz. 10).

Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 6 marca 2025 roku w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy – Prawo budowlane (Dz.U. 2025, poz. 418, Warszawa, 1 kwietnia 2025).

DYREKTYWY
Dyrektywa 2010/75/UE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 24 listopada 2010 roku w sprawie emisji przemysłowych (zintegrowane zapobieganie zanieczyszczeniom i ich kontrole).

Dyrektywa 2008/98/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 19 listopada 2008 roku w sprawie odpadów oraz uchylająca niektóre dyrektywy.

Dyrektywa 2006/12/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 5 kwietnia 2006 roku w sprawie odpadów.

Dyrektywa 2004/35/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 21 kwietnia 2004 roku w sprawie odpowiedzialności za środowisko w odniesieniu do zapobiegania i zaradzania szkodom wyrządzonym środowisku naturalnemu.

Dyrektywa 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2000 roku ustanawiająca ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej.

NORMY:
PN-EN 10088-1:2024-06 Stale odporne na korozję – Część 1: Wykaz stali odpornych na korozję

PN-EN ISO 5817:2023-08 Spawanie. Złącza spawane ze stali, niklu, tytanu i ich stopów (z wyjątkiem spawanych wiązką). Poziomy jakości według niezgodności spawalniczych

PN-EN ISO 8517:2023-08 Welding. Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded). Quality levels for imperfections

PN-EN 14735:2022-04 Charakterystyka odpadów - Przygotowanie próbek odpadów do badań ekotoksyczności (Characterization of waste - Preparation of waste samples for ecotoxicity tests)

PN-EN ISO 10863:2020-12 Badania ultradźwiękowe. Zastosowanie techniki dyfrakcji fal ultradźwiękowych (TOFD)

PN-EN ISO 6892-1:2020-05 Metale. Próba rozciągania. Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej

PN-EN ISO 17640:2019-01 Badania nieniszczące złączy spawanych. Badania ultradźwiękowe złączy spawanych. Techniki, poziomy badania i ocena

PN-EN ISO 11666:2018-04 Badanie nieniszczące złączy spawanych. Badania ultradźwiękowe złączy spawanych. Poziomy akceptacji

PN-EN ISO 15626:2018-10 Badania nieniszczące. Technika czasu przejścia wiązki dyfrakcyjnej (TOFD). Poziomy akceptacji

PN-EN ISO 15494:2018-12 Systemy przewodów rurowych z tworzyw sztucznych do zastosowań przemysłowych - Polibuten (PB), polietylen (PE), polietylen o podwyższonej odporności na temperaturę (PE-RT), polietylen usieciowany (PE-X), polipropylen (PP) – szeregi metryczne do specyfikacji elementów i systemu

PN-EN ISO 5577:2017-04 Badania nieniszczące. Badania ultradźwiękowe. Terminologia

PN-EN ISO 23279:2017-11 Badania nieniszczące spoin. Badania ultradźwiękowe. Charakterystyka wskazań w spoinach

PN-EN ISO 14001:2015 System zarządzania środowiskowego

PN-EN ISO 16810:2014-06 Badania nieniszczące. Badania ultradźwiękowe. Część 1: Zasady ogólne

PN-EN ISO 16828:2014-06 Badania nieniszczące. Badania ultradźwiękowe. Dyfrakcyjna technika czasu przejścia jako sposób wykrywania i wymiarowania nieciągłości

PN EN ISO 17637:2011 Badania nieniszczące złączy spawanych. Badania wizualne złączy spawanych

PN-EN ISO 17640:2011 Badania nieniszczące spoin. Badania ultradźwiękowe złączy spawanych

PN-EN ISO 10893-8:2011 Badania nieniszczące rur stalowych. Część 8: Automatyczne badanie ultradźwiękowe rur stalowych bez szwu i spawanych w celu wykrycia rozwarstwień

PN-EN ISO 10893-8:2011/A1:2020-12 Badania nieniszczące rur stalowych. Część 8: Automatyczne badanie ultradźwiękowe rur stalowych bez szwu i spawanych w celu wykrycia rozwarstwień

PN-EN ISO 10893-10:2011 Badania nieniszczące rur stalowych. Część 10: Automatyczne ultradźwiękowe badanie rur stalowych bez szwu i spawanych (z wyłączeniem rur spawanych łukiem krytym) w celu wykrycia nieciągłości wzdłużnych i/lub poprzecznych

PN-EN ISO 10893-11:2011 Badanie nieniszczące rur stalowych. Część 11: Automatyczne badanie ultradźwiękowe spoin rur stalowych spawanych w celu wykrycia nieciągłości wzdłużnych i/lub poprzecznych,

PN-EN ISO 4063:2009 Spawanie i procesy pokrewne. Nazwy i numery procesów

PN-EN ISO 5817: 2009 Spawalnictwo. Złącza spawane ze stali, niklu, tytanu i ich stopów (z wyjątkiem spawanych wiązką). Poziomy jakości według niezgodności spawalniczych

PN-EN ISO 6520-1:2009 Spawanie i procesy pokrewne. Klasyfikacja geometrycznych niezgodności spawalniczych w metalach. Część 1: Spawanie

PN-EN ISO 14040:2009 Zarządzanie środowiskowe. Ocena cyklu życia. Zasady i struktura

PN-EN 1993-1-1:2006 Konstrukcje stalowe. Reguły ogólne i reguły dla budynków

PN-EN 14899:2006 Charakteryzowanie odpadów. Pobieranie próbek materiałów. Struktura przygotowania i zastosowania planu pobierania próbek

PN-EN 1990:2004 Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji

PN-EN 10307:2004 Badania nieniszczące. Badania ultradźwiękowe wyrobów płaskich ze stali nierdzewnej austenitycznej i austenityczno-ferrytycznej o grubości równej lub większej niż 6 mm (metoda echa)

PN-EN 1330-1:2001 Badania nieniszczące. Terminologia. Terminy ogólne; aktualna norma PN-EN ISO 1330-1:2015-04 (wersja angielska)

PN-EN 1330-3:1999 Badania nieniszczące. Terminologia. Część 3. Terminy stosowane w radiograficznych badaniach przemysłowych; aktualna norma PN-EN ISO 5579:2014

PN-EN 1330-4:2001 Badania nieniszczące. Terminologia. Część 4. Terminy stosowane w badaniach ultradźwiękowych; aktualna norma PN-EN ISO 5577:2017-04

PN-EN 1330-5:2001 Badania nieniszczące. Terminologia. Część 5. Terminy stosowane w badaniach metodą prądów wirowych; aktualna norma PN-EN ISO 12718:2008

PN-EN 1290:2000 Badania nieniszczące złączy spawanych. Badania magnetyczno-proszkowe złączy spawanych

PN-EN 571-1:1999 Badania nieniszczące. Badania penetracyjne. Zasady ogólne

PN-EN 970:1999 Spawalnictwo. Badania nieniszczące złączy spawanych. Badania wizualne

PN-EN 970:1999/Ap1:2003 Spawalnictwo. Badania nieniszczące złączy spawanych. Badania wizualne

PN-91/H-04310 Próba statyczna rozciągania metali

PN-89/M-01134 Rysunek techniczny maszynowy. Uproszczenia rysunkowe

PN-87/M-69008 Spawalnictwo. Klasyfikacja konstrukcji spawanych

DOKUMENTACJE
Archiwum KGHM Polska Miedź S.A.: Dokumentacja zawierająca zestawienia awarii rurociągów odpadów poflotacyjnych, 2018÷2023.

Archiwum KGHM O/ZH (2020): Widok na Obiekt Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych OUOW Żelazny Most

Archiwum KGHM Polska Miedź S.A. (2011): Schemat poglądowy infrastruktury technicznej Obiektu Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych OUOW Żelazny Most

STRONY INTERNETOWE
www.archiwum.ciop.pl – marzec 2024

www.bing.com/images/search - marzec 2024

www.condukmin.com – lipiec 2024

www.gov.pl/web/gios - lipiec 2024

www.komes.pl – marzec 2024

www.magazynit.pl – marzec 2024

www. navitest.com.pl – marzec 2024

www.ultrarent.pl – marzec 2024

www.quakewrap.com.au – lipiec 2024

www.volpe.dot.gov – lipiec 2024

https://inzynierbudownictwa.pl/dobrze-rozwiniety-system-monitoringu-podstawa-bezpiecznej-eksploatacji-obiektow-hydrotechnicznych-na-przykladzie-ouow-zelazny-most/ - 2024

https://legnica.naszemiasto.pl/ksiezycowy-krajobraz-zbiornika-zelazny-most-nalezacego-do/ga/c15-7949199/zd/57127131 – 2024

STRESZCZENIE

W kopalniach podziemnych KGHM Polska Miedź S.A. w Polsce, ruda miedzi zawiera do 2,66% czystej miedzi wydobywanej na powierzchnię poprzez szyby wydobywcze, która jest następnie przekazywana do Zakładów Wzbogacania Rud ZWR. W procesie wzbogacania flotacji w ZWR otrzymuje się koncentrat miedzi na poziomie do 26%, który przetwarza się w hutach na czystą miedź i srebro. Pozostała część urobku, stanowiąca odpad poflotacyjny, jest przesyłana siecią rurociągów do Obiektu Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych OUOW Żelazny Most. Hydrotransport odpadów poflotacyjnych na trasie z Zakładu Wzbogacania Rud na Obiekt Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych OUOW Żelazny Most przebiega ciśnieniowo rurociągami przesyłowymi magistralnymi, o średnicach nominalnych od 800 do 1000 mm, na łącznej długości około L=250 km, przyczyniając się do szybkiej ścieralności, tzw. abrazji instalacji technologicznej.

Odpady stałe pozostają na obiekcie OUOW Żelazny Most, a woda po sklarowaniu zostaje zawrócona do ponownego wykorzystania w Zakładach Wzbogacania Rud. Ewentualna nadwyżka wody po oczyszczeniu jest zrzucana do rzeki Odry.

Wydobycie rudy miedzi i jej przetworzenie na czysty metal, czyli miedź, generuje szereg problemów technicznych na każdym etapie produkcji, tj. od wydobycia poprzez przeróbki, które odbywają się w trzech Zakładach Wzbogacania Rud ZWR, aż do zrzutów odpadów poflotacyjnych, powstających w procesie wzbogacania rudy miedzi. Odpad poflotacyjny powstały w procesie flotacji do Zakładu Wzbogacania Rud jest codziennie transportowany rurociągami technologicznymi kierowanymi na Obiekt Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych OUOW Żelazny Most.

W sieciach przesyłowych występuje zjawisko ścieralności rurociągów oraz armatury technicznej, w tym zasuw, kompensatorów stalowych i części zamiennych do pomp, powodując konieczność wymiany rurociągów i armatury.

Celem pracy doktorskiej jest ograniczenie awarii infrastruktury technicznej odpadów poflotacyjnych z flotacji rudy miedzi w KGHM Polska Miedź S.A. Aby dokonać ograniczenia awarii, w pracy zestawiono awarie rurociągów przesyłowych i armatury technologicznej, które wydarzyły się w latach 2018÷2023 na Obiekcie

Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych OUOW Żelazny Most, jak również przedstawiono propozycje rozwiązań zapobiegających awariom i ograniczających koszty, jakie ponosi KGHM Polska Miedź S.A. w celu ich usunięcia. We wnioskach końcowych, po przeanalizowaniu zestawionych przyczyn awarii, sposobów ich usunięcia, jak również po przeprowadzonej analizie numerycznej, która wspomogła proces interpretacji przyczyn awarii, przedstawiono rozwiązania techniczne, które powinny w znaczący sposób ograniczyć stan awaryjny infrastruktury technicznej w KGHM Polska Miedź S.A.

SUMMARY

In the underground mines of KGHM Polska Miedź S.A. in Poland, copper ore contains up to 2,66% of pure copper which is excavated to the surface through mining shafts, which is then transferred to the Ore Enrichment Plants (Polish name: Zakłady Wzbogacania Rud ZWR). In the flotation enrichment process at the Ore Enrichment Plant, a copper concentrate of approximately 26% is obtained, which is processed in smelters into pure copper and silver. The remaining part of the ore, constituting flotation waste, is transported through the pipelines to the Mining Waste Disposal Facility (Polish name: Obiekt Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych Żelazny Most OUOW). The hydrotransport of flotation waste from the Ore Enrichment Plant to the Mining Waste Disposal Facility runs under pressure through main pipelines, with nominal diameters from 800 to 1000 mm, over a total length of approximately 250 km, contributing to rapid abrasion of the technological installation.

Solid waste remains at the Żelazny Most Tailings Storage Facility, while clarified water is recycled for reuse in the Ore Enrichment Plants. Any excess water, after purification, is discharged into the Odra River.

The extraction of copper ore and its processing into pure metal, i.e. copper, generates a number of technical challenges at every stage of production, from excavation through processing, which takes place in three Ore Enrichment Plants, to the disposal of flotation waste generated in the copper ore enrichment process. Flotation waste generated in the flotation process in the Ore Enrichment Plant is transported daily *via* technological pipelines directed to the Żelazny Most Tailings Storage Facility.

In transmission networks, there is a phenomenon of abrasion of pipelines and technological fittings, including valves, steel compensators and spare parts for pumps, causing the need to replace pipelines and technological fittings. The aim of this doctoral thesis is to reduce the failure rate of the technical infrastructure associated with copper ore flotation waste in KGHM Polska Miedź S.A. To achieve this, the work summarizes the failures of transmission pipelines and technological fittings that occurred between the years 2018-2023 at the Żelazny Most Mining Waste Disposal Facility. Additionally, this doctoral thesis presents proposed solutions to prevent such failures and reduce the

costs incurred by KGHM Polska Miedź S.A. In the final conclusions, after analyzing the summarized causes of failures, methods for their elimination, and performing numerical analyzes to support the interpretation of the failure causes, technical solutions are proposed that should significantly reduce the failure rate of the technical infrastructure at KGHM Polska Miedź S.A.

ZAŁĄCZNIK 1

Wykaz zarejestrowanych zdarzeń
o znamionach awarii i/lub poważnej awarii
w latach 2019÷2023

Lp.	Data	Miejscowość	Opis ogólny	Skutki
1	2019-02-05	Gdańsk	W wyniku rozszczelnienia rurociągu doszło do wycieku oleju opałowego ciężkiego.	Wyciek oleju opałowego ciężkiego w ilości ok. 100 kg. Zanieczyszczenie gleby na powierzchni ok. 0,01 ha.
2	2019-05-24	Płock	W zakładzie zajmującym się produkcją paliw silnikowych oraz szerokiego asortymentu produktów i półproduktów ropopochodnych, rafineryjnych i petrochemicznych, w wyniku awarii zaworu bezpieczeństwa na instalacji ekspedycji olefin, doszło do wycieku ciekłego tlenku etylenu.	Wyciek ciekłego tlenku etylenu w ilości ok. 10-20 kg.
3	2019-06-03	Tarnów	W zakładzie zajmującym się produkcją chemiczną, podczas przygotowywania instalacji SHA do postoju, w trakcie opróżniania chłodnic oraz rurociągów technologicznych, do zbiornika pod instalacją w krótkim czasie spłynęło ok. 100 dm^3 kwasu siarkowego. W wyniku zdarzenia nastąpiła egzotermiczna reakcja chemiczna.	Emisja tlenków azotu do atmosfery w ilości ok. 15 kg.
4	2019-07-08	Buniewice	W okolicach odwiertu pod Wyspą Chrząszczewską, należącego do zakładu zajmującego się wydobyciem ropy naftowej, doszło do rozszczelnienia rurociągu i wycieku mieszaniny ropy naftowej z siarkowodorem.	Wyciek mieszaniny ropy naftowej oraz siarkowodoru w ilości ok. 1,5 m^3. Zanieczyszczenie gruntów uprawnych na powierzchni ok. 0,065 ha.
5	2019-07-25	Tarnów	W zakładzie zajmującym się produkcją chemiczną, w wyniku nieskutecznego opróżnienia remontowego odcinka rurociągu, doszło do wycieku oleum.	Wyciek oleum w ilości ok. 10 kg, w tym ok. 5 kg tritlenku siarki, do tacy zabezpieczającej pod zbiornikiem.
6	2019-08-18	Police	W zakładzie zajmującym się produkcją wieloskładnikowych nawozów mineralnych oraz azotowych, na instalacji przygotowywania gazu procesowego, w trakcie odślepiania wlotu gazu do metanizatora, doszło do zapłonu gazu procesowego, który na wejściu do instalacji składa się z gazu ziemnego, powietrza i pary wodnej.	Emisja gazu procesowego w trudnej do oszacowania ilości. 2 osoby zostały ranne i były hospitalizowane.

7	2019-08-28	Warszawa	W wyniku rozszczelnienia rurociągów położonych w syfonie pod dnem Wisły, przesyłających ścieki z lewobrzeżnej Warszawy na oczyszczalnię, podjęto decyzję o wprowadzaniu ścieków przemysłowych, bytowych i opadowych z lewobrzeżnej Warszawy bezpośrednio do rz. Wisły awaryjnym kanałem burzowym.	Zanieczyszczenie rz. Wisły (obszar Natura 2000) na długości ok. 0,1 km, nieoczyszczonymi ściekami (stanowiącymi mieszaninę ścieków bytowych, przemysłowych oraz wód opadowych), w których znajdowały się substancje szczególnie szkodliwe dla środowiska wodnego tj. rtęć, kadm, aldryna, trichlorometan.
8	2019-09-05	Płock	W zakładzie zajmującym się produkcją paliw silnikowych oraz szerokiego asortymentu produktów i półproduktów ropopochodnych, rafineryjnych i petrochemicznych, w trakcie uruchamiania instalacji hydrokrakingu po remoncie, nastąpiło rozszczelnienie połączenia kołnierzowego na rurociągu, emisja i zapłon gazu poreakcyjnego, przechodzącego z instalacji w cyrkulację. Kołnierz rozszczelnił się na wysokości ok. 6 m na rurociągu wychodzącym z reaktora, bez możliwości jego odcięcia.	Emisja produktów spalania gazu poreakcyjnego, zawierającego w swoim składzie węglowodory oraz siarkowodór, do powietrza, w trudnej do oszacowania ilości.
9	2019-10-18	Ostrołęka	W zakładzie zajmującym się produkcją, przesyłem i dystrybucją energii elektrycznej i ciepła, w wyniku rozszczelnienia chłodnicy uszczelniającej turbozespół elektrowni, nastąpił wyciek oleju turbinowego do kanału zrzutowego wód pochłodniczych, a następnie do rz. Narew.	Wyciek ok. 3 m^3 oleju turbinowego (stanowiącego mieszaninę destylatów ciężkich parafinowych obrabianych wodorem (ropa naftowa oraz 2,6-di-tert-butylo-p-krezol) oraz oleju bazowego) do kanału zrzutowego wód pochłodniczych. Ok. 0,6 m^3 oleju przedostało się do rz. Narew (należącej do obszaru Natura 2000 Dolina Dolnej Narwi) powodując jej zanieczyszczenie na długości ok. 27 km.
10	2019-11-05	Warszawa	Podczas prowadzenia prac ziemnych doszło do uszkodzenia rurociągu i wycieku gazu ziemnego.	Wyciek gazu ziemnego w ilości ok. 700 kg. Ewakuacja 115 osób na czas ok. 2 godz. Przerwa w dostawie gazu na czas ok. 3,5 godz.
11	2020-01-16	Gdańsk	W zakładzie zajmującym się przetwarzaniem, magazynowaniem oraz dystrybucją produktów naftowych, na instalacji opóźnionego koksowania, w wyniku awarii zaworów bezpieczeństwa, doszło do emisji gazów procesowych. Węglowodory pochodzące z procesu koksowania z pracującego reaktora przedostały się do reaktora, który był w fazie otwartego przedmuchu parą wodną, wskutek czego nastąpiło cofnięcie gazów procesowych i ich emisja.	Emisja węglowodorów (zawierających m. in. siarkowodór oraz jego pochodne) do atmosfery. Z terenu zakładu ewakuowano 3 pracowników na czas ok. 2 godz. Zasięg awarii nie przekroczył granic zakładu.
12	2020-01-27	Tarnów	W kopalni gazu ziemnego, podczas prowadzenia prac remontowych w odwiercie eksploatacyjnym, w trakcie wyciągania z odwiertu żerdzi pompowych, obciążników i pompy wpuszczanej, nastąpił krótkotrwały wyrzut gazu ziemnego i ropy naftowej.	Wyciek gazu ziemnego w ilości ok. 1,5 m^3 oraz ropy naftowej w ilości ok. 0,4 Mg.

13	2020-03-31	Płock	W zakładzie zajmującym się produkcją paliw silnikowych oraz produktów i półproduktów ropopochodnych, rafineryjnych i petrochemicznych, w obrębie instalacji produkcji petrochemikaliów (etylenu, propylenu wykorzystywanych m.in. do wytwarzania tworzyw sztucznych i plastiku) doszło do emisji pirogazu spod izolacji poziomowskazu na separatorze.	Emisja pirogazu w postaci: 10 kg cieczy oraz 10 kg gazu (skład pirogazu: 21% wodoru, 33% metanu, 33% etylenu, 5% propylenu oraz śladowych ilości etanu, propanu oraz węglowodorów cięższych).
14	2020-04-01	Płock	W zakładzie zajmującym się produkcją paliw silnikowych oraz szerokiego asortymentu produktów i półproduktów ropopochodnych, rafineryjnych i petrochemicznych, poddawano próbom ciśnieniowym rurociąg opróżniony z mediów technologicznych. Podczas prowadzenia prac związanych z wyjmowaniem zaślepki po próbie ciśnieniowej, mieszanina azotu i gazu wodorowego uległa zapłonowi.	Gwałtowny i krótkotrwały zapłon mieszaniny azotu oraz gazu wodorowego w ilości ok. 10 kg. Całość wyemitowanych gazów palnych uległa natychmiastowemu spaleniu.
15	2020-05-12	Gdynia	Na wyłączonym z użytkowania rurociągu, wskutek ścięcia starej instalacji kradzieżowej przez wewnętrzny tłok czyszczący, doszło do rozszczelnienia rurociągu i wycieku zalegających w jego wnętrzu zanieczyszczeń oraz oleju napędowego.	Wyciek oleju napędowego w trudnej do oszacowania ilości. Zanieczyszczenie gleby na powierzchni ok. 0,0008 ha. Z miejsca zdarzenia wywieziono ok. 60 Mg zanieczyszczonej gleby.
16	2020-04-13	Lublin	Na terenie terminala paliw, prowadzącego działalność w zakresie rozładunku, przyjmowania, magazynowania oraz dystrybucji produktów naftowych i bioestrów, na instalacji odzysku par benzyn, doszło do rozszczelnienia połączenia kołnierzowego na rurociągu cyrkulacyjnym benzyny i wycieku ww. substancji.	Instalacja odzysku par benzyn posadowiona jest w niecce żelbetonowej z bezpośrednim odpływem do kanalizacji wewnętrznej. Do niecki zostało uwolnione ok. 6900 dm^3 benzyny, która została skierowana do kanalizacji zakładu i zatrzymana w zbiornikach retencyjnych ścieków.
17	2020-04-24	Krupski Młyn	W wyniku uszkodzenia chłodnicy instalacji do produkcji Nitrocetu50 (2-etyloheksylu /2EHN/) doszło do wycieku ww. substancji i zanieczyszczenia wód rz. Mała Panew (stanowiącej obszar chroniony Natura 2000 - Dolina Małej Panwi PLH160008).	Do rzeki przedostało się ok. 0,5 m^3 emulsji Nitrocetu50 z wodą chłodniczą, w tym ok. 300 kg samej substancji. Doszło do zanieczyszczenia rz. Mała Panew na długości ok. 5 km

18	2020-05-17	Wołomin	W zakładzie zajmującym się produkcją antyutleniaczy aminowych, w hali produkcyjnej doszło do pęknięcia szklanego wziernika, stanowiącego element ciągu technologicznego. W wyniku zdarzenia nastąpił wyciek i zapłon materiału palnego (mieszanina trójetyloaminy w postaci rozproszonej) w okolicy reaktora procesowego.	Emisja produktów spalania do powietrza. Jeden pracownik zakładu został ranny i był hospitalizowany (pracownik ze względu na doznane obrażenia powinien być hospitalizowany kilkanaście godzin jednak ze względu na przypadek wirusa COVID-19 na terenie oddziału szpitalnego, w którym przebywał, okres hospitalizacji wydłużył się do 10 dni). Straty materialne na terenie zakładu w wysokości ok. 62 000 zł.
19	2020-07-11	Tarnów	Na terenie przedsiębiorstwa przemysłu chłodniczego, w wyniku rozszczelnienia na połączeniu zaworu kołnierzowego, doszło do emisji gazowego amoniaku.	Emisja gazowego amoniaku w ilości ok. 1 kg. Ewakuacja 26 osób z terenu zakładu na czas ok. 0,5 godz.
20	2020-08-03	Gdańsk	Na rurociągu przesyłowym ropy naftowej, wskutek ścięcia starej instalacji kradzieżowej przez tzw. tłok inteligentny (którego zadaniem było przejście przez rurociąg, dokonanie oceny stanu technicznego od wewnątrz oraz wyczyszczenie) doszło do rozszczelnienia rurociągu i wycieku ropy naftowej.	Wyciek ropy naftowej w ilości ok. 5,5 m^3. Zanieczyszczenie nieużytków rolnych na powierzchni ok. 0,04 ha.
21	2020-08-24	Chorzów	Na Instalacji Produkcji Saletry Potasowej doszło do wykipienia niewielkiej ilości półproduktu znajdującego się w reaktorze syntezy azotanu potasu. W wyniku zdarzenia 2 pracowników zakładu zostało poszkodowanych.	Doszło do wycieku niewielkiej ilości azotanu potasu. 2 pracowników zakładu zostało poszkodowanych i byli hospitalizowani.
22	2020-08-25	Tarnów	W zakładzie prowadzącym produkcję chemiczną (m.in. amoniak, kwas azotowy, oleum, kwas siarkowy, kwas solny), podczas przepływu wodoru z instalacji wytwórni wodoru do instalacji uwodornienia fenolu, zauważono stałą liniową tendencję wzrostową ciśnienia w instalacji uwodornienia fenolu. Gdy ciśnienie osiągnęło poziom 2,50 MPa, nastąpiło otwarcie zaworu bezpieczeństwa, wyciek i zapłon wodoru w kolektorze wylotowym.	Spaleniu uległ wodór w ilości ok. 0,09 Mg.
23	2020-08-29	Warszawa	W wyniku rozszczelnienia rurociągów położonych w syfonie pod dnem Wisły, przesyłających ścieki z lewobrzeżnej Warszawy na oczyszczalnię, podjęto decyzję o wprowadzaniu ścieków przemysłowych, bytowych i opadowych z lewobrzeżnej Warszawy bezpośrednio do rz. Wisły awaryjnym kanałem burzowym.	Zanieczyszczenie rz. Wisły (obszar Natura 2000) na długości ok. 0,1 km, nieoczyszczonymi ściekami (stanowiącymi mieszaninę ścieków bytowych, przemysłowych oraz wód opadowych), w których znajdowały się substancje szczególnie szkodliwe dla środowiska wodnego tj. rtęć, kadm, aldryna, trichlorometan.

24	2020-08-31	Brzeg Dolny	W zakładzie zajmującym się produkcją chemii organicznej i nieorganicznej, na wydziale produkcji chloru, doszło do awarii stacji niszczenia odgazów i wycieku chloru.	Emisja chloru w ilości ok. 6-12 kg. Ewakuacja 17 osób z terenu zakładu na czas ok. 3 godz.
25	2020-09-13	Jaworzno	W wyniku nagłego napływu elementów stałych rurami kanalizacyjnymi, doszło do zatkania działających przed pompownią separatorów, co wymusiło awaryjny zrzut ścieków surowych do rz. Białej Przemszy.	W ściekach odprowadzonych do rz. Biała Przemsza, stwierdzono przekroczenie warunków *Rozporządzenia Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej* z dnia 12 lipca 2019 r., w zakresie parametrów: BZT5, CHZTCr, zawiesiny ogólnej, azotu ogólnego, azotu amonowego, chlorków i siarczanów. Zrzut ścieków nie spowodował wizualnego zanieczyszczenia rzeki, stąd nie było możliwości oceny na jakiej długości została zanieczyszczona.
26	2020-09-23	Gdańsk	W zakładzie prowadzącym produkcję nawozów sztucznych i związków azotowych, w wyniku rozszczelnienia zbiornika doszło do wycieku płynnej siarki do warstwy otuliny, która po nasiąknięciu ww. substancją zapaliła się.	Emisja produktów spalania do powietrza. Nie doszło do zapłonu siarki wewnątrz zbiornika. W bezpośrednim sąsiedztwie zbiornika, na którym nastąpił pożar znajdowało się 5 zbiorników zawierających płynną siarkę oraz kwas siarkowy, w wyniku czego istniało zagrożenie wybuchem substancji chemicznych.
27	2020-10-09	Płock	W zakładzie zajmującym się produkcją paliw silnikowych oraz produktów i półproduktów ropopochodnych, rafineryjnych i petrochemicznych, podczas uruchamiania instalacji hydroodsiarczania oleju napędowego po postoju, doszło do rozszczelnienia chłodnicy powietrznej i wycieku wodoru.	Wyciek wodoru w ilości ok. 20 kg.
28	2020-10-30	Kraków	W zakładzie zajmującym się m.in. produkcją koksu, spieku oraz stali, podczas prowadzenia prac remontowych na instalacji suchego chłodzenia koksu, w hali kotłów doszło do miejscowego wycieku tlenku węgla.	Zatrucie tlenkiem węgla dwóch pracowników: - jeden był hospitalizowany, - drugi zmarł w szpitalu w wyniku doznanych obrażeń.
29	2020-11-18	Płock	W zakładzie zajmującym się produkcją paliw silnikowych oraz produktów i półproduktów ropopochodnych, rafineryjnych i petrochemicznych, podczas prowadzenia prac remontowych na instalacji destylacji ropy naftowej, doszło do rozszczelnienia i wycieku gorącego gudronu.	Wyciek frakcji próżniowej w ilości ok. 0,9 Mg. Dwie osoby zostały ranne, z których jedną hospitalizowano.

30	2021-01-07	Oświęcim	W zakładzie zajmującym się produkcją kauczuków syntetycznych, tworzyw styrenowych, środków ochrony roślin oraz dyspersji i lateksów, na instalacji do produkcji kauczuków i lateksów doszło do wybuchu i pożaru dopalacza termicznego.	Emisja produktów spalania do powietrza. Straty materialne na terenie zakładu w wysokości 13,5 mln zł.
31	2021-01-16	Płock	W zakładzie zajmującym się produkcją paliw silnikowych oraz szerokiego asortymentu produktów i półproduktów ropopochodnych, rafineryjnych i petrochemicznych, na instalacji Furfurolu, doszło do wycieku lekkiego oleju opałowego.	Wyciek oleju napędowego w ilości ok. 40 Mg na nieutwardzony grunt w obrębie zbiornika.
32	2021-02-05	Warszawa	W zakładzie zajmującym się utylizacją odpadów komunalnych, podczas prowadzenia prac remontowych na turbinie kondensacyjnej, doszło do wycieku a następnie zapłonu oleju.	Wyciek oleju w ilości ok. 0,3 Mg. Straty materialne na terenie zakładu w wysokości ok. 2 mln zł.
33	2021-02-16	Częstochowa	W zakładzie zajmującym się chemicznym przetwarzaniem węgla koksowniczego, podczas prowadzenia prac związanych z wymianą kurka odcinającego gaz opałowy koksowniczy, w tunelu rewersyjnym wydziału piecowni, doszło do pożaru i wybuchu gazu koksowniczego.	Dwie osoby zostały ranne, z których jedną hospitalizowano.
34	2021-03-29	Tarnów	W zakładzie prowadzącym produkcję chemiczną (m.in. amoniak, kwas azotowy, oleum, kwas siarkowy, kwas solny), doszło do rozszczelnienia rurociągu i wycieku amoniaku.	Wyciek amoniaku w ilości ok. 7 kg na glebę oraz plac utwardzony pod rurociągiem.
35	2021-04-07	Kędzierzyn Koźle	W zakładzie prowadzącym produkcję wyrobów należących do dziedziny chemii organicznej, podczas procesu produkcji żywicy fenolowo-formaldehydowej, doszło do wybuchu reaktora. Do reaktora wprowadzono substancje w postaci ciekłej - fenol w ilości ok. 770 kg, formalinę w ilości 620 kg oraz katalizator w postaci wodorotlenku sodu.	W wyniku wybuchu, żywica (substancja nierozpuszczalna w wodzie, obojętna dla środowiska, nieposiadająca cech niebezpiecznych) przedostała się na zewnątrz reaktora. Straty materialne na terenie zakładu w wysokości ok. 200 000 zł.
36	2021-04-19	Płock	W zakładzie zajmującym się produkcją paliw silnikowych oraz szerokiego asortymentu produktów i półproduktów ropopochodnych, rafineryjnych i petrochemicznych, podczas remontu instalacji służącej do produkcji petrochemikaliów (etylenu, propylenu wykorzystywanych m.in. do wytwarzania tworzyw sztucznych i plastiku), doszło do eksplozji pyłu, który powstał w trakcie usuwania pierścieni stalowych z kolumny destylacyjnej.	Dwie osoby poszkodowane: - jedna osoba ranna, hospitalizowana przez czas 70 godz. - jedna osoba w wyniku doznanych oparzeń zmarła, po hospitalizacji trwającej 230 godz.
37	2021-05-28	Pruszcz Gdański	Zanieczyszczenie rz. Raduni związkami ropopochodnymi, wydostającymi się z separatora.	Zanieczyszczenie rz. Radunia substancjami ropopochodnymi na długości ok. 2-3 km.

38	2021-06-09	Trzebinia	W zakładzie zajmującym się produkcją paliw silnikowych oraz szerokiego asortymentu produktów i półproduktów ropopochodnych, rafineryjnych i petrochemicznych, doszło do rozszczelnienia rurociągu transportującego olej napędowy między zbiornikami magazynowymi.	Wyciek oleju napędowego w ilości ok. 9 kg, na powierzchni ok. 100 m^3.
39	2021-09-07	Tarnów	W zakładzie prowadzącym produkcję chemiczną (m.in. amoniak, kwas azotowy, oleum, kwas siarkowy, kwas solny), podczas prowadzenia prac remontowych na instalacji selektywnego uwodornienia fenolu, doszło do wycieku ww. substancji.	Wyciek fenolu w ilości ok. 23 kg - 20 kg wyciekło na tacę pod instalacją, natomiast 3 kg odparowało do powietrza.
40	2021-10-25	Tarnów	W zakładzie prowadzącym produkcję chemiczną (m.in. amoniak, kwas azotowy, oleum, kwas siarkowy, kwas solny), na terenie instalacji do oczyszczania ścieków, na tacy stokażowej zbiorników magazynowych ścieków surowych, doszło do pożaru niezidentyfikowanej substancji.	Niekontrolowana emisja produktów spalania do powietrza. Poparzeniu uległ jeden pracownik zakładu.
41	2021-11-03	Płock	W zakładzie zajmującym się produkcją paliw silnikowych oraz szerokiego asortymentu produktów i półproduktów ropopochodnych, rafineryjnych i petrochemicznych, podczas prowadzenia prac serwisowych na instalacji hydroodsiarczania olejów napędowych, doszło do wycieku i zapłonu wodoru.	Wyciek i zapłon wodoru w ilości ok. 0,5 kg. Dwóch pracowników wykonujących prace serwisowe zostało rannych - jednego hospitalizowano przez okres 24 godz., natomiast drugiego przez okres 264 godz.
42	2021-11-19	Warszawa	W zakładzie zajmującym się wytwarzaniem energii cieplnej i elektrycznej, doszło do pożaru oleju turbinowego na zaworze parowym stacji obejściowej wysokoprężnej turbiny parowej bloku gazowo-parowego.	Zapłon oleju turbinowego w ilości ok. 100 kg.
43	2021-11-30	Chorzów	W zakładzie zajmującym się produkcją substancji chemicznych, na instalacji nadtlenku benzoilu 50% doszło do pożaru.	Emisja produktów spalania do powietrza. Straty materialne na terenie zakładu w wysokości 1 mln zł.
44	2021-12-28	Zakęcie	W zakładzie prowadzącym działalność w zakresie składowania odpadów sklasyfikowanych jako odpady z wydobywania kopalin, na terenie podziemnego składowiska odpadów, doszło do wycieku substancji ropopochodnych.	Zanieczyszczenie gruntu na powierzchni ok. 30 m^3.
45	2022-01-15	Wielowieś	Na terenie wygrodzonej stacji zasuw, podczas tłoczenia bazowego oleju napędowego nową nitką rurociągu do kawerny zakładu o dużym ryzyku wystąpienia poważnej awarii przemysłowej, doszło do rozszczelnienia zasuw i wycieku ww. substancji.	Wyciek bazowego oleju napędowego w ilości ok. 300 kg. Zanieczyszczenie gleby na powierzchni ok. 10 m2.

46	2022-02-07	Baby Dolne	W wyniku mikropęknięcia rurociągu przesyłowego substancji ropopochodnej (benzyna i olej napędowy) doszło do wycieku ww. substancji na pola uprawne.	Zanieczyszczenie gruntów rolnych oraz cieku wodnego na łącznej powierzchni ok. 1,57 ha.
47	2022-02-18	Płock	W zakładzie zajmującym się produkcją paliw silnikowych oraz szerokiego asortymentu produktów i półproduktów ropopochodnych, rafineryjnych i petrochemicznych, na instalacji tlenku etylenu doszło do wycieku mieszaniny wody i tlenku etylenu z kolumny destylacji.	Emisja miała miejsce na terenie wyposażonym w betonową tacę z odpływem do kanalizacji przemysłowej, skąd zanieczyszczenie trafiło do zakładowej oczyszczalni ścieków przemysłowych.
48	2022-04-22	Gdańsk	W zakładzie zajmującym się produkcją materiałów i wyrobów asfaltowych, na instalacji produkcji wodoru, podczas procesu zmiany medium z gazu ziemnego na benzynę lekką, doszło do zarzucenia benzyny lekkiej do instalacji, a następnie jej zapłonu.	Doszło do wycieku i zapłonu benzyny lekkiej. Lokalny pożar w obrębie instalacji, który został opanowany przez Zakładową Straż Pożarną.
49	2022-06-08	Ciechanów	W zakładzie zajmującym się produkcją wyrobów mlecznych, podczas prowadzenia prac serwisowych na instalacji chłodniczej doszło do wycieku amoniaku.	Wyciek amoniaku w ilości ok. 2 kg.
50	2022-08-02	Gdańsk (obwodnica Trójmiasta)	Podczas transportu kwasu siarkowego 96% doszło do wycieku ww. kwasu z dwóch dolnych zaworów autocysterny.	Wyciek kwasu siarkowego 96% - większa część kwasu wyparowała, natomiast reszta wyciekła na jezdnię oraz pas drogowy w ilości ok. 700 kg. Jedna osoba została ranna.
51	2022-09-07	Środa Wielkopolska	W zakładzie zajmującym się produkcją cukru, na instalacji oczyszczania soku cukrowniczego, doszło do wycieku gazu saturacyjnego (gaz powstający podczas pracy pieca wapiennego, w którego skład wchodzi: tlenek węgla, dwutlenek węgla, azot, tlen, para wodna i inne zanieczyszczenia).	W wyniku zdarzenia: - poszkodowanych zostało 7 osób (podtrucie), które były hospitalizowane przez czas ok. 24 godz. - ewakuacja 183 osób.
52	2022-09-27	Płock	W zakładzie zajmującym się produkcją paliw silnikowych oraz szerokiego asortymentu produktów i półproduktów ropopochodnych, rafineryjnych i petrochemicznych, podczas rozruchu instalacji hydroodsiarczania gudronu doszło do wybuchu. W instalacji znajdował się gaz rozruchowy (nie będący produktem).	W wyniku zdarzenia 2 pracowników zakładu poniosło śmierć (osoby pracujące bezpośrednio przy obsłudze pieca).
53	2022-10-11	Łania	W wyniku rozszczelnienia rurociągu, doszło do wycieku ropy naftowej.	Zanieczyszczenie gleby na powierzchni ok. 1,5 ha.

54	2022-11-21	Gdynia	W zakładzie zajmującym się gospodarowaniem, przetwarzaniem i unieszkodliwianiem odpadów niebezpiecznych oraz destylacją zużytych rozpuszczalników, na terenie którego znajdowało się kilkaset mauzerów i beczek z odpadami płynnymi, doszło do pożaru.	Emisja produktów spalania do atmosfery (farby oraz mieszanina różnego rodzaju rozpuszczalników organicznych (m. in.: octan metyloksylen, octan butylu, metyloketon, n-metylopirolidon, izopropanol, aceton, wysokowrzące węglowodory alifatyczne typu D60)), która wytworzyła toksyczne opary. Część farb i rozpuszczalników pozostała na powierzchni wód pogaśniczych tworzących rozlewisko na nieutwardzonym gruncie na powierzchni ok. 1 ha.
55	2022-11-25	Rozalin	Podczas prowadzenia prac budowlanych, polegających na przyłączeniu instalacji gazowej do budynku jednorodzinnego, doszło do uszkodzenia rurociągu, wycieku i zapłonu gazu ziemnego.	Emisja gazu ziemnego do atmosfery w ilości ok. 0,98 kg.
56	2022-11-30	Gdańsk	Podczas przetłaczania ropy naftowej z jednego rurociągu do drugiego (w celu opróżnienia rurociągu i zainstalowania tłoka czyszczącego), pod wpływem wysokiego ciśnienia panującego w rurociągu wąż pompy tłoczącej paliwo pękł. W wyniku zdarzenia doszło do wycieku ropy naftowej.	Wyciek ropy naftowej w ilości ok. 1,9 Mg. Zanieczyszczeniu uległa droga oraz grunt na łącznej powierzchni ok. 100-150 m^3.
57	2022-11-30	Augustów	W budynku kotłowni zakładu zajmującego się produkcją wyrobów tytoniowych, podczas przełączania źródła zasilania w kotłach z gazu na olej opałowy, doszło do rozszczelnienia przewodu w instalacji zasilania kotłów i wycieku oleju napędowego grzewczego.	Wyciek oleju napędowego grzewczego (czystej substancji) w ilości ok. 5500 dm3. Ok. 3600 dm^3 mieszaniny oleju ze ściekami zostało wychwycone w separatorze znajdującym się na terenie zakładu (substancję wypompowano), ok. 100 dm^3 spłynęło do studzienki kanalizacyjnej (substancję wypompowano), natomiast ok. 2000 dm^3 przedostało się do kanalizacji ściekowej. Łącznie wypompowano ok. 5700 dm3 mieszaniny oleju opałowego ze ściekami znajdującymi się w studzience i separatorze.
58	2022-12-20	Płock	W zakładzie zajmującym się produkcją paliw silnikowych oraz szerokiego asortymentu produktów i półproduktów ropopochodnych, rafineryjnych i petrochemicznych, doszło do rozszczelnienia rurociągu znajdującego się na estakadzie (na wysokości około 6 m nad poziomem terenu) i wycieku węglowodorów ciekłych.	Wyciek węglowodorów ciekłych (frakcja benzen-toluen) w ilości ok. 2 Mg, częściowo na teren nieutwardzony, zamarznięty grunt.
59	2023-01-18	Wrocław	Na terenie hali produkcyjnej zakładu zajmującego się produkcją maszyn, urządzeń i wyposażenia dla gospodarstw pozyskujących mleko, w wyniku rozszczelnienia instalacji rurociągowej doprowadzającej kwas azotowy 55% do zbiornika magazynowego doszło do wycieku ww. kwasu do misy okalającej zbiornik.	Wyciek kwasu azotowego 55% w ilości ok. 0,25 Mg do misy okalającej zbiornik - nie doszło do przedostania się kwasu poza instalację. Ewakuacja 34 osób z terenu zakładu na czas ok. 45 min.

60	2023-02-20	Płock	Na terenie zakładu zajmującego się produkcją margaryny oraz innych tłuszczów jadalnych podczas prowadzenia prac serwisowych doszło do rozszczelnienia instalacji i wycieku amoniaku.	Wyciek gazu płynnego LPG zawierającego siarkowodór w ilości trudnej do oszacowania. 2 pracowników zakładu zostało poszkodowanych, z których jeden zmarł.
61	2023-03-06	Bielsko-Biała	Zanieczyszczenie rz. Odry substancjami ropopochodnymi w górnym porcie śluzy Malczyce.	Emisja amoniaku w formie gazowej w ilości ok. 1,4 Mg przez instalację wentylacyjną na dach i dalej do powietrza. W związku z akcją ratowniczą prowadzoną przez PSP (podawanie prądu wody na dach) powstała woda amoniakalna, która kanalizacją deszczową zakładu spłynęła do rz. Białej powodując jej zanieczyszczenie na długości ok. 0,14 km. W dniu 7 marca 2023 r. ujawniono lokalne śnięcie narybku i pojedynczych sztuk ryb poniżej wylotu kanalizacji deszczowej zakładu.
62	2023-03-07	Płock	W zakładzie zajmującym się m.in. produkcją gazów technicznych, chemikaliów organicznych i nieorganicznych, nawozów sztucznych i związków azotowych, na wydziale kwasu azotowego doszło do rozszczelnienia rurki magistrali i wycieku oleju smarującego w układzie olejowym turbozespołu.	Wyciek oleju napędowego w ilości ok. 0,85 Mg poprzez separator substancji ropopochodnych -> studzienkami wód opadowych (na terenie zakładu) -> do systemu kanalizacji deszczowej miejskiej -> a następnie do rz. Brzeźnicy powodując jej zanieczyszczenie na długości ok. 6,53 km.
63	2023-03-12	Puławy	Na terenie zakładu zajmującego się produkcją mięsa oraz przetworów mięsnych, w wyniku rozszczelnienia instalacji chłodniczej doszło do wycieku amoniaku.	Wyciek oleju smarującego w ilości ok. 1 Mg, z czego ok. 0,05-0,1 Mg poprzez studzienki kanalizacyjne przedostało się do kanalizacji opadowej.
64	2023-03-17	Starachowice	Przedostanie się substancji ropopochodnych kolektorem (z działki, na której zlokalizowany był zakład produkcji mebli na zamówienie) do cieku wodnego.	Wyciek amoniaku w ilości ok. 0,03 Mg. Ewakuacja 609 osób z terenu zakładu. Rannych zostało 5 osób, z których 4 hospitalizowano przez czas ok. 48 godz.
65	2023-04-22	Płock	Na terenie zakładu zajmującego się wytwarzaniem i przetwarzaniem produktów rafinacji ropy naftowej, podczas prowadzenia prac przygotowawczych do remontu wykonywanych na połączeniach kołnierzowych przy pochodni doszło do pożaru gazów palnych.	Wyciek inhibitora polimeryzacji w ilości ok. 0,001 Mg. 1 osoba została ranna i była hospitalizowana przez czas ok. 192 godz.

66	2023-04-28	Płock	Na terenie zakładu zajmującego się wytwarzaniem i przetwarzaniem produktów rafinacji ropy naftowej, w obrębie układu jednej z pochodni doszło do wycieku frakcji ciekłej węglowodorów.	Emisja produktów spalania do powietrza. 2 osoby zostały poszkodowane (pracownicy firmy zewnętrznej) i były hospitalizowane przez czas ok. 12240 godz.
67	2023-05-17	Płock	Na terenie zakładu zajmującego się dystrybucją chemiczną doszło do rozszczelnienia zbiornika i wycieku kwasu solnego 33%.	Wyciek frakcji ciekłej węglowodorów w ilości ok. 0,02 Mg na teren nieutwardzony, co spowodowało powstanie zagrożenia zanieczyszczenia środowiska. Przeprowadzono wymianę zanieczyszczonej warstwy ziemi (wytworzono ok. 25,6 Mg odpadu, który przetransportowano w celu oczyszczenia).
68	2023-06-22	Bydgoszcz	Na terenie zakładu zajmującego się wytwarzaniem i przetwarzaniem produktów rafinacji ropy naftowej, w rejonie stacji generowania dwutlenku chloru doszło do rozszczelnienia zbiornika i wycieku kwasu siarkowego 92-98%.	Wyciek kwasu solnego 33% w ilości ok. 0,08 Mg na teren utwardzony, do gruntu w sąsiedztwie zbiorników oraz do kanalizacji.
69	2023-07-17	Płock	Na terenie zakładu zajmującego się wytwarzaniem surowców chemicznych służących do produkcji wyrobów akrylowych, podczas procesu polimeryzacji doszło do zakłóceń, co w konsekwencji doprowadziło do niedrożności armatury instalacji łączącej separator ze zbiornikiem zrzutowym zawierającym kondensat. W wyniku niecałkowitego skroplenia się surowców (akrylanu butylu, estru butylowego, kwasu akrylowego, metakrylanu metylu stabilizowanego, ksylenu i octanu n-butylu) w chłodnicach, w kolankach rurociągu wytworzyła się gęsta sieć błon, która przerwała drożność pomiędzy separatorem a zbiornikiem zrzutowym. Brak odpowiedniej temperatury w separatorze doprowadził do tego, że ww. monomery odpływając do zbiornika zrzutowego zatrzymały się i zaczopowały się w kolankach instalacji. Ww. monomery pod wpływem ciśnienia wydostały się z separatora poprzez tzw. oddech na dach budynku -> następnie rynnami dachowymi przedostały się do kanalizacji deszczowej -> i poprzez wylot wód opadowych do cieku Zuzanka.	Wyciek kwasu siarkowego 92-98% w ilości ok. 5 Mg na betonową posadzkę. 1 osoba została ranna (poparzenie nóg pracownika wykonującego prace w rejonie zdarzeni) i była hospitalizowana przez czas ok. 96 godz.

70	2023-07-18	Włocławek	Na terenie laboratorium zakładu zajmującego się produkcją chemikaliów i wyrobów chemicznych, podczas procesu syntezy w reaktorze doszło do emisji 4-nitrofenolu. Uszkodzeniu uległ przewód zasilający piec termiczny w wodę, przez co woda wylała się na podłogę. Substancja w połączeniu z wodą rozlana była na podłodze pomieszczenia. Nastąpiło silne zadymie korytarza oraz pomieszczeń laboratorium.	Wyciek monomerów (akrylanu butylu, estru butylowego, kwasu akrylowego, metakrylanu metylu stabilizowanego, ksylenu i octanu n-butylu) w łącznej ilości ok. 0,12 Mg. Zanieczyszczenie cieku Zuzanka na długości ok. 0,3 km.
71	2023-07-22	Zielona Góra	W wyniku rozszczelnienia rurociągu doszło do wycieku surowej ropy naftowej.	Emisja produktów spalania do powietrza. Zanieczyszczenie wód powierzchniowych w kanale Gęśnik na długości ok. 3 km.
72	2023-08-05	Sobiczewy	Na terenie magazynu doszło do przedostania się nieznanej substancji chemicznej przez studzienki kanalizacyjne - do rz. Bytomki - a dalej do rz. Kłodnicy.	Wyciek ropy naftowej w ilości trudnej do oszacowania - podczas akcji ratowniczej zebrało mieszaninę ropy naftowej i wody w łącznej ilości ok. ok. 60 m3. Zanieczyszczenie gruntów uprawnych na powierzchni ok. 3,5 ha.
73	2023-09-29	Rybno	Na terenie zakładu zajmującego się produkcją wyrobów chemicznych, na zapleczu centrum badawczo-rozwojowego doszło do rozszczelnienia zbiornika ciśnieniowego zawierającego fluorek trifluoroacetylu.	Emisja gazu ziemnego do powietrza. Ewakuacja 35 osób z terenu zagrożonego na czas ok. 2 godz.
74	2023-09-29	Kędzierzyn - Koźle	Na terenie zakładu zajmującego się produkcją nawozów mineralnych i chemikaliów, podczas przygotowywania do remontu nieszczelnego odcinka rurociągu doszło do wycieku wody amoniakalnej 24%.	Wyciek fluorku trifluoroacetylu w postaci gazu skroplonego w ilości ok. 0,04 Mg.
75	2023-10-23	Grodzisk Mazowiecki	Na terenie zakładu zajmującego się produkcją nawozów mineralnych i chemikaliów doszło do rozszczelnienia rurociągu i wycieku oleum.	Uszkodzenie mienia na terenie zakładu w wysokości ok. 9 mln zł. Emisja produktów spalania do powietrza. Łącznie spaleniu uległo ok. 0,08 Mg mieszanin zawierających m.in.: - 1-etoksyropan-2-ol, - etanol, - octan etylu, - propan-1-ol, - 1-metoksypropan-2-ol, - octan izopropylu, - 2-etoksypropanol, - eter monoetylowy glikolu propylenowego.

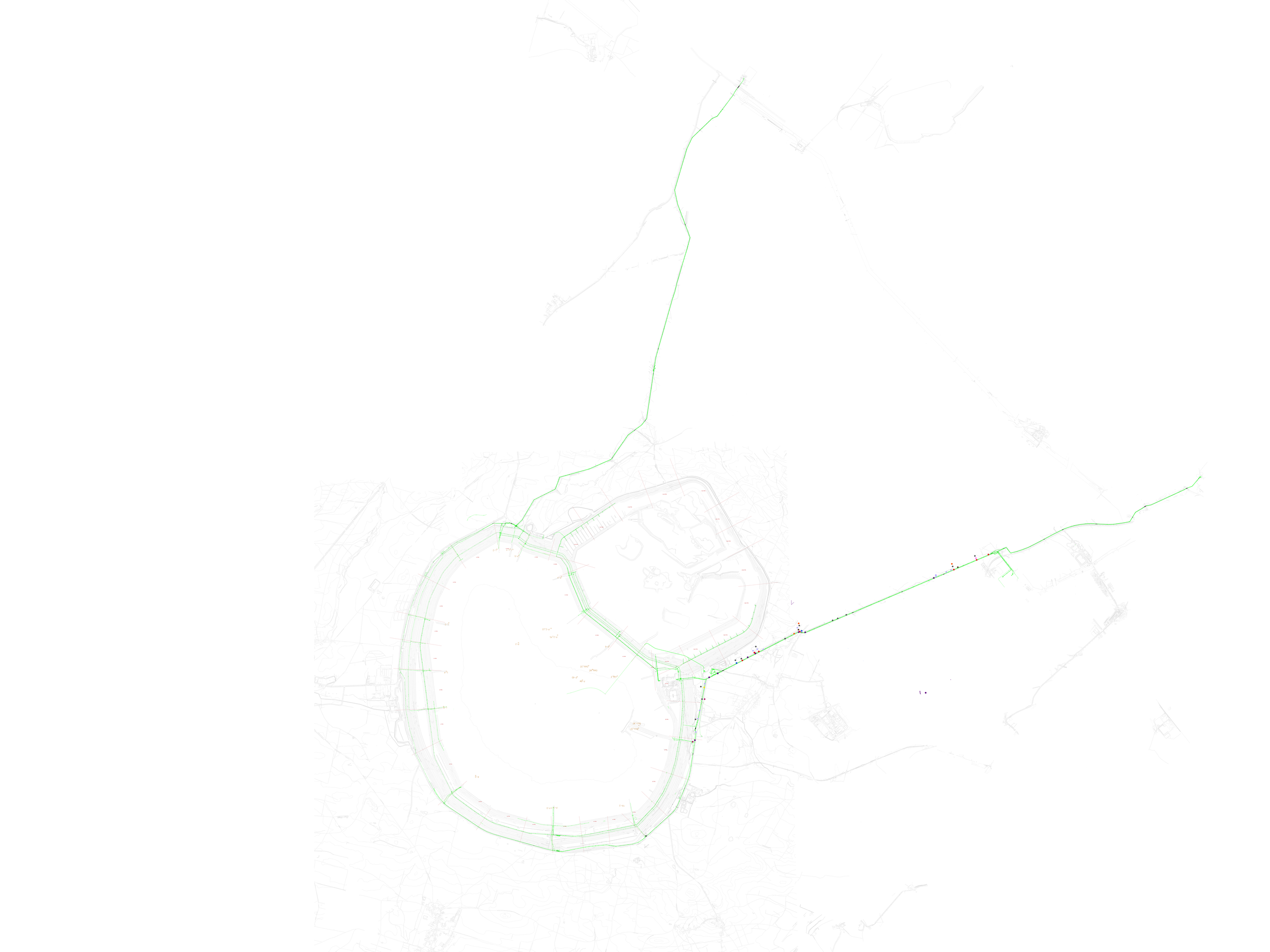
76	2023-10-26	Tarnów	Na terenie terminala kontenerowego, podczas załadunku na statek doszło do rozszczelnienia kontenera i emisji podtlenku azotu.	Wyciek oleum w ilości ok. 0,01 Mg na tacę zabezpieczającą instalację. Emisja gazowego trójtlenku siarki do powietrza.
77	2023-11-13	Płock	Na terenie zakładu zajmującego się wytwarzaniem i przetwarzaniem produktów rafinacji ropy naftowej podczas prowadzenia prac serwisowych na instalacji demineralizacji wody doszło do uszkodzenia zaworu i wycieku kwasu siarkowego 92-96%.	Emisja produktów spalania do powietrza (głównie gudronu). Straty materialne na terenie zakładu w wysokości ok. 5 mln zł.
78	2023-11-15	Płock	Na terenie zakładu zajmującego się wytwarzaniem i przetwarzaniem produktów rafinacji ropy naftowej, na instalacji hydrokrakingu doszło do wycieku gazu płynnego zawierającego siarkowodór.	Wyciek kwasu siarkowego 92-96% w ilości ok. 0,001 Mg. 1 osoba została ranna (poparzenie pracownika znajdującego się w rejonie instalacji) i była hospitalizowana.
79	2023-11-17	Płock	W budynku hali magazynowej będącej miejscem nielegalnego składowania odpadów doszło do pożaru odpadów niebezpiecznych (substancji chemicznych zawierających w swoim składzie związki chemiczne o działaniu toksycznym).	Wyciek gazu płynnego zawierającego siarkowodór w ilości trudnej do oszacowania Śmierć jednego pracownika zakładu.
80	2023-11-23	Kędzierzyn-Koźle	Na terenie zakładu zajmującego się przetwórstwem owoców i produkcją zagęszczonych soków owocowych, w wyniku rozszczelnienia instalacji chłodniczej doszło do wycieku amoniaku.	Emisja produktów spalania do powietrza.

Źródło rejestru zdarzeń:

www.gov.pl/web/gios (lipiec 2024)

ZAŁĄCZNIK 2

Mapa lokalizacji awarii na sieci hydrotransportu odpadów poflotacyjnych rudy miedzi



ZAŁĄCZNIK 3

Zestawienie Tablic opracowanych dla wdrożenia rozwiązań technicznych w celu ograniczenia awarii infrastruktury technicznej odpadów poflotacyjnych z flotacji rudy miedzi w KGHM Polska Miedź S.A.

Tablica Z.3.1.
Zestawienie istotnych parametrów do monitoringu

Dane techniczne sieci hydrotransportu odpadów poflotacyjnych	**NAZWA RUROCIĄGU** Średnica rurociągu/ armatury D_n [mm]	Okres pracy rurociągu/ armatury [roboczogodziny/ maszynogodziny]	Prace remontowe - rodzaj prac - okres trwania prac	Prace awaryjne - rodzaj prac - okres trwania prac	Prace inwestycyjne - rodzaj prac - okres trwania prac
Części tras rurociągów odpadów poflotacyjnych – szczegóły w Tablicy Z. 3.2					
Części zabudowanej armatury na sieci hydrotransportu odpadów – szczegóły w Tablicy Z.3.3					

Tablica Z.3.2.
Szczegółowe zestawienie danych z monitoringu dla części tras hydrotransportu odpadów poflotacyjnych

Dane techniczne sieci hydrotransportu odpadów poflotacyjnych	**NAZWA RUROCIĄGU** Średnica rurociągu/ armatury D_n [mm] Dane z monitoringu	Okres pracy rurociągu/ armatury [roboczogodziny/ maszynogodziny]	Prace remontowe - rodzaj prac - okres trwania prac	Prace awaryjne - rodzaj prac - okres trwania prac	Prace inwestycyjne - rodzaj prac - okres trwania prac
Części tras hydrotransportu odpadów poflotacyjnych: Rurociągi odpadowe:					
a) na trasie z ZWR Rudna: 1) A1 2) A2 3) B1 4) B2					
b) na trasie z ZWR Polkowice: 1) P4 2) P3 3) P2 4) P1					
c) na trasie od komory Rozrządu „RG”: 1) R1 2) R2 3) R3 4) R5 5) R6					
d) na trasie od węzła „H”, Pompowni „H”: 1) R1 2) R2 3) R3 4) R5					
e) na trasie od węzła „B”: 1) R1 2) R2 3) R3					

f) na trasie od węzła „Z”: 1) R1 2) R2 3) R3					
g) na trasie od węzła „P” w kierunku Pompowni Północnej: 1) NR1 2) NR2					
h) na trasie od ZWR Lubin: 1) L1 2) L2 3) L3					
i) na trasie od Komory Rozrządu Szlamów LG: 1) L1 2) L0 3) L2 4) L3					
j) na trasie od węzła „J”: 1) L1 2) L2 3) L3					
k) na trasie od węzła „L”: 1) L1 2) L2 3) L3					

Tablica Z.3.3.
Szczegółowe zestawienie danych z monitoringu dla części zabudowanej armatury, tj. zasuw na sieci hydrotransportu odpadów poflotacyjnych

Dane techniczne sieci hydrotransportu odpadów poflotacyjnych	**NAZWA RUROCIĄGU** Średnica rurociągu/ armatury D_n [mm] Dane z monitoringu	Okres pracy rurociągu/ armatury [roboczogodziny/ maszynogodziny]	Prace remontowe - rodzaj prac - okres trwania prac	Prace awaryjne - rodzaj prac - okres trwania prac	Prace inwestycyjne - rodzaj prac - okres trwania prac
Części zabudowanej armatury na sieci hydrotransportu odpadów, z uwzględnieniem podziału na elementy składowe: ZASUWA *1) korpus* *2) pokrywa* *3) wrzeciono* *4) tuleja do uszczelnienia typu o-ring* *5) klin* *6) gniazdo uszczelniające*					
a) na trasie z ZWR Rudna: 1) zasuwa B11 2) zasuwa B12 3) zasuwa B13 4) zasuwa B14 5) zasuwa B21 6) zasuwa B22 7) zasuwa B23 8) zasuwa B24					
b) na trasie od Węzła „KR” rejon Komory Rozrządu „RG”: a) zasuwy RB13 2) zasuwy RB12 3) zasuwy RB 25					
c) na trasie od węzła „KRP” rejon Komory „RG” zasuwy: 1) KR1 2) KR2 3) KR3					

4) KR4 5) KR5 6) KR6 7) KR46 8) WRP30 9) RD13 10) WRP20 11) WRO10 12) RD21 13) RD22 14) WRP2 15) WRP1 16) WRP3					
d) na trasie od węzła „H” zasuwy: 1) H1 2) H2 3) H3 4) H12 5) H22 6) H31 7) H5 8) H51 9) H62 10) H107 11) H16 12) H117 13) H127 14) H101 15) H102 16) H107A 17) H172 18) H171 19) H130 20) H110 21) H118 22) H128 23) H181 24) H182 25) H183 26) H138					

e) na trasie od węzła „B” zasuwy: 1) B1 2) B2 3) B3 4) B19 5) B29 6) B35 7) B50 8) B5 9) B59					
f) na trasie od węzła „Z” zasuwy: 1) Z1 2) Z2 3) Z19 4) Z29					
g) na trasie od węzła „P”, oraz Przepompowni „R” zasuwy: 1) P1 2) P2 3) P3 4) P20 5) P10 6) P30 7) P29 8) P39 9) P40 10) P31					
h) na trasie z ZWR Polkowice zasuwy: 1) ZPL4 2) ZPL34 3) ZPL1 4) ZPL2 5) ZPL3					
i) na trasie komory „LG” zasuwy: 1) LK1 2) LK2 3) LK3 4) LK20					

5) LK14 6) LK24 7) LK25 8) LK35 9) KL0 10) KL1 11) KL2 12) KL3 13) LK42 14) LK4 15) LK43 16) LK53 17) LK50 18) LK5 19) LK52					
j) na trasie od węzła „K” zasuwy: 1) KL10 2) KL03 3) K0 4) K01					
k) na trasie od węzła „J” zasuwy: 1) J2 2) J3 3) J03 4) J04					
l) na trasie od węzła „L” zasuwy: 1) LH30 2) L11 3) L13 4) L30 5) LH1 6) LH10 7) L17 8) L10 9) L19 10) L29 11) L39 12) LH6 13) LH5 14) LH7					

15) L37 16) L35 17) L23 18) L50 19) L40 20) L54 21) L45					

Tablica Z.3.4.
Szczegółowe zestawienie danych z monitoringu dla części zabudowanej armatury, tj. przepustnic na sieci hydrotransportu odpadów poflotacyjnych

Dane techniczne sieci hydrotransportu odpadów poflotacyjnych	**NAZWA RUROCIĄGU** Średnica rurociągu/ armatury D_n [mm] Dane z monitoringu	Okres pracy rurociągu/ armatury [roboczogodziny/ maszynogodziny]	Prace remontowe - rodzaj prac - okres trwania prac	Prace awaryjne - rodzaj prac - okres trwania prac	Prace inwestycyjne - rodzaj prac - okres trwania prac
Części zabudowanej armatury na sieci hydrotransportu odpadów, z uwzględnieniem podziału na elementy składowe: <u>PRZEPUSTNICE</u> *1) korpus* *2) dysk* *3) łożysko wału* *4) pierścień uszczelniający* *5) gniazdo uszczelniające* *6) wał napędowy* *7) pokrętło*					
a) na trasie z węzła „KRP" rejon Komory „RG": 1) przepustnica PP11 2) przepustnica PP12					

Tablica Z.3.5.
Zestawienie parametrów analizowanych danych technicznych rurociągów stalowych odpadów poflotacyjnych do badań ultradźwiękowych

Dane techniczne sieci hydrotransportu odpadów poflotacyjnych	**NAZWA RUROCIĄGU** Średnica rurociągu/ armatury D_n [mm] Dane z monitoringu	Okres pracy rurociągu/ armatury [roboczogodziny/ maszynogodziny]	Wynik badania ultradźwiękowego - data badania - grubość ścianki rury [mm]	Prace remontowe - rodzaj prac - okres trwania prac	Prace awaryjne - rodzaj prac - okres trwania prac
Części tras hydrotransportu odpadów poflotacyjnych: Rurociągi odpadowe:					
a) na trasie z ZWR Rudna: 1) A1 2) A2 3) B1 4) B2					
b) na trasie z ZWR Polkowice: 1) P4 2) P3 3) P2 4) P1					
c) na trasie od Komory Rozrządu „RG”: 1) R1 2) R2 3) R3 4) R5 5) R6					
d) na trasie od węzła „H”, Pompowni „H”: 1) R1 2) R2 3) R3 4) R5					
e) na trasie od węzła „B”: 1) R1 2) R2 3) R3					

f) na trasie od węzła „Z”: 1) R1 2) R2 3) R3					
g) na trasie od węzła P w kierunku Pompowni Północnej: 1) NR1 2) NR2					
h) na trasie od ZWR Lubin: 1) L1 2) L2 3) L3					
i) na trasie od Komory Rozrządu Szlamów LG: 1) L1 2) L0 3) L2 4) L3					
j) na trasie od węzła J: 1) L1 2) L2 3) L3					
k) na trasie od węzła „L”: 1) L1 2) L2 3) L3					

Tablica Z.3.6.
Zestawienie istotnych parametrów dla opomiarowania rurociągu i pozostałej instalacji będących podstawą w Centralnym Rejestrze Danych CRD

Dane techniczne sieci hydrotransportu odpadów poflotacyjnych	Rodzaj urządzenia kontrolno-pomiarowego - nazwa urządzenia	Data pomiaru, wyniki pomiarów	Okres pracy rurociągu/ armatury [roboczogodziny/ maszynogodziny]	Prace remontowe - rodzaj prac - okres trwania prac
Części tras hydrotransportu odpadów poflotacyjnych –szczegóły w Tablicach Z.3.2 i Z.3.3				

Tablica Z.3.7.
Zestawienie istotnych danych technicznych do zastosowania nowych materiałów do zabudowy w hydrotransporcie odpadów poflotacyjnych będących podstawą w Centralnym Rejestrze Danych CRD

Dane techniczne sieci hydrotransportu odpadów poflotacyjnych	**NAZWA RUROCIĄGU** Średnica rurociągu/ armatury D_n [mm]	Data pomiaru, wyniki pomiarów	Okres pracy rurociągu/ armatury [roboczogodziny/ maszynogodziny]	Prace inwestycyjne - rodzaj prac - okres trwania prac
A.Części tras hydrotransportu odpadów poflotacyjnych – szczegóły w Tablicy Z.3.2				
Średnica armatury, D_n [mm]				
- Kompensatory stalowe -Trasy rurociągów przesyłowych				
K1-K2				
K2-K3				
K3-K4				
K4-K5				
K5-K6				
K6-K7				
K7-K8				
K8-K9				
K9-K10				
K10-K11				
K11-K12				
K12-K13				
K13-K14				
K14-K15				
K15-K16				
K16-K17				
K17-K18				
K18-K19				
K19-K20				
K20-K21				
K21-K22				
K22-K23				
K23-K24				

K24-K25				
K25-K26				
K26-K27				
K27-K28				
K28-K29				
K29-K30				
K30-K31				
K31-K32				
K32-K33				
K33-K34				
K34-K35				
K35-K36				
K36-K37				
K37-K38				
K38-K39				
K39-K40				
K40-K41				
K41-K42				
K42-K43				
K43-K44				
K44-K45				
K45-K46				
K46-K47				
K47-K48				
K48-K49				
K49-K50				
K50-K51				
K51-K52				
K52-K53				
K53-K54				
K54-K55				
K55-K56				
K56-K57				
K57-K58				
K58-K59				
K59-K60				
B. Części zabudowanej armatury na sieci hydrotransportu odpadów – szczegóły w Tablicy Z.3.3.				

Tablica Z.3.8.
Propozycja wdrożenia Instrukcji technologicznej spawania (WPS) w zastosowaniu programu wdrożenia zwiększonych wymogów odbiorowych prac technicznych będących podstawą w Centralnym Rejestrze Danych CRD, opracowana zgodnie z PN-EN ISO 15609-1:2020-03

INSTRUKCJA TECHNOLOGICZNA SPAWANIA **WPS nr …….**	
Miejscowość: ……. Instrukcja Technologiczna Spawania Wytwórcy (WPS) Nr: …… Protokół uznania technologii spawania WPAR Nr: …….. Wytwórca: ……. Imię i nazwisko spawacza: ……... Proces spawania: ……..…. Rodzaj złącza: ……..…. Zadanie pn.: ……. Sposób przygotowania i czyszczenia: Specyfikacja materiału podstawowego: Gatunek stali: Grubość materiału: Pozycja spawania: Szczegóły przygotowania do spawania (schemat):	Inspektor Nadzoru:

Rysunek złącza		**Kolejność spawania**	
Szczegóły dotyczące spawania			
Nr ściegu	Proces spawania	Wymiar spoiwa [mm]	Natężenie prądu [A]
Napięcie łuku [V]	Rodzaj prądu biegun.	Prędkość podawania drutu [m/min]	Prędkość przesuwu [mm/min]
Ilość ciepła [J]			

Klasyfikacja spoiwa i nazwa handlowa:

Specjalne zalecenia suszenia:

Gaz: osłona
Podkładka:
Prędkość przepływu gazu:
Osłonowy:
Formujący:
Szczegóły żłobienia/podkładki:
Temperatura podgrzewania wstępnego:
Temperatura międzyściekowa:
Obróbka cieplna po spawaniu:

Inne informacje:
Oscylacja:
Szczegóły spawania łukiem pulsującym:
Wylot drutu:
Szczegóły spawania plazmowego:
Kąt ustawienia uchwytu: