

Rola oddziaływań hydrodynamicznych w awarii rurociągów syfonowych w Warszawie w roku 2019

ZBIGNIEW KLEDYŃSKI*, APOLONIUSZ KODURA

Politechnika Warszawska, Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska

Streszczenie: Projektowanie wielkośrednicowych rurociągów ciśnieniowych, zwłaszcza w nietypowych lokalizacjach i ze specyficznych materiałów stawia przed inżynierami trudne wyzwania. Jednym z istotnych aspektów, które w takich okolicznościach należy wziąć pod uwagę, są oddziaływania hydrodynamiczne, będące formą przekazywania obciążeń od strumienia płynącej cieczy na konstrukcję rurociągów. Wielkość tych oddziaływań jest związana z geometrią i statyką przewodu, zmiennością przepływu oraz chwilowymi wartościami ciśnienia. W konsekwencji możliwe jest wykształcenie zmiennego w czasie układu sił, który może prowadzić do zmęczeniowego uszkodzenia konstrukcji. W artykule przeprowadzono analizę oddziaływań hydrodynamicznych na rurociągi syfonowego przerzutu ścieków pod dnem Wisły w Warszawie w kontekście ich awarii w roku 2019. Omówiono udział tych oddziaływań w wywołaniu i przebiegu awarii, wiążąc wyniki obliczeń i oszacowań z mechanizmem i postacią zniszczenia.

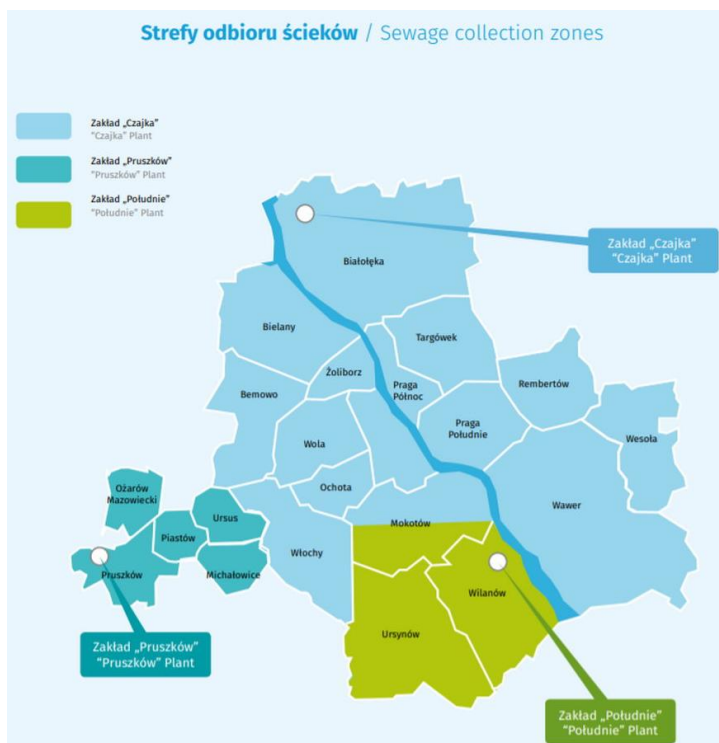
Słowa kluczowe: wielkośrednicowy rurociąg ciśnieniowy, rurociąg syfonowy, oddziaływania hydrodynamiczne, uszkodzenia zmęczeniowe, awaria rurociągu

1. Opis systemu kanalizacyjnego

Aglomerację warszawską zamieszkuje ponad 2,6 mln mieszkańców, z czego ponad 1,7 mln w samej Warszawie. W stolicy zlokalizowanych jest szereg instytucji i przedsiębiorstw, w których codziennie przebywają tysiące osób. Tak duże skupisko miejskie wymaga nowoczesnego i złożonego systemu odbioru ścieków. Generalnie kanalizacja miejska Warszawy jest ogólnospławna. Sieć kanalizacji rozdzielczej: deszczowej i bytowej stanowi mniejszość. Miejskie Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji w m. st. Warszawie S.A. zajmuje się dystrybucją wody i odbiorem ścieków. Średnio około 350 tysięcy metrów sześciennych wody [1] jest dostarczane codziennie do odbiorców na terenie aglomeracji. Łączna długość sieci wodociągowej wynosi około 4400 km, a kanalizacyjnej około 4300 km [1]. Rzeka Wisła jest jednocześnie miejscem poboru części wody, która następnie poddawana jest procesom uzdatniania oraz odbiornikiem oczyszczonych ścieków miejskich. Na terenie aglomeracji zlokalizowane są cztery oczyszczalnie ścieków, z których największa – Oczyszczalnia Ścieków „Czajka” – rocznie oczyszcza około 164 tysiące metrów sześciennych ścieków [1], co stanowi około 80% wszystkich oczyszczonych ścieków Warszawy (tab. 1.). OŚ „Czajka” zlokalizowana jest w północno-wschodniej części Warszawy i odbiera ścieki

*Autor do korespondencji: zbigniew.kledynski@pw.edu.pl; , apoloniusz.kodura@pw.edu.pl

z wszystkich 7 dzielnic prawobrzeżnych oraz znacznej części lewobrzeżnych: Bielany, Bemowa, Żoliborza, Woli, Ochoty, Śródmieścia, Włoch oraz części Mokotowa. (rys. 1). System kanalizacyjny lewobrzeżnych dzielnic składa się z szeregu kolektorów, prowadzących ścieki w kierunku Układu Przesyłowego (zlokalizowanego w rejonie Mostu Północnego im. Marii Curie-Skłodowskiej), którego zadaniem jest ujmowanie i kontrolowane odprowadzanie ścieków bezpośrednio do OŚ Czajka.



Rys. 1. Strefy odbioru ścieków dla aglomeracji warszawskiej. [1]

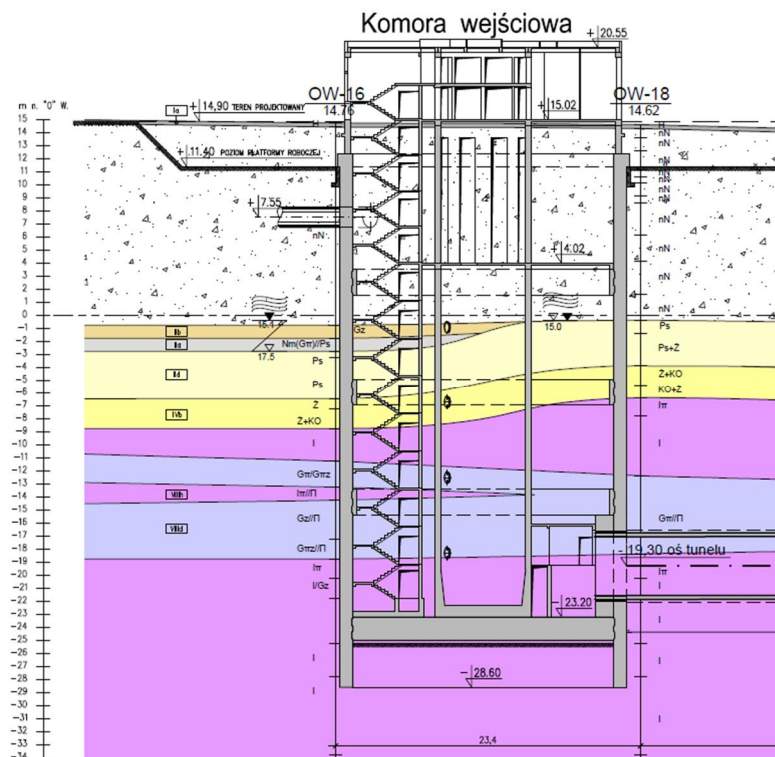
Tablica 1. Ilość [m³] ścieków oczyszczonych w latach 2016-2107 [1]

Wyszczególnienie	Rok 2016	Rok 2017
Zakład „Czajka”	144 272	164 215
Zakład „Dębe”	1 563	1 914
Zakład „Południe”	21 891	22 651
Zakład „Pruszków”	12 339	15 041
Razem	180 065	203 821

2. Charakterystyka Układu Przesyłowego

Układ Przesyłowy pełni funkcję odbiorczo-regulacyjną i pozwala na ujęcie ścieków doprowadzonych Kolektorem Burakowskim i Burakowskim Bis (o średnicy rzędu 3,0 m każdy). W początkowym odcinku przepływ odbywa się grawitacyjnie, natomiast kolizja z rzeką została rozwiązana w formie ciśnieniowych rurociągów syfonowych. Po stronie praskiej, w Zakładzie „Świdrska”, zlokalizowano komorę rozprężną, z której w kierunku OŚ „Czajka” prowadzi kolektor grawitacyjny DN2800, o długości około 6 km [2].

Główny strumień ścieków jest ujmowany w Kolektorze Burakowskim i Burakowskim Bis, dalej ścieki transportowane są do komory K5 (połączeniowej), skąd kierowane są do Budynku Krat w Zakładzie „Farysa” dwoma przewodami grawitacyjnymi DN2000 każdy. W Budynku Krat, na 6 kratkach, następuje proces wstępnego mechanicznego usunięcia większych ciał stałych transportowanych w ściekach (początkowy prześwit krat 50 mm, został zredukowany po awarii w 2019 r. do 25 mm) i skierowanie ścieków do jednej lub obu nitek syfonowych o średnicy DN1600 każda. W Budynku Krat możliwe jest wykonanie zrzutu awaryjnego do rzeki, w sytuacji gdy ilość dopływających ścieków jest większa niż możliwości Układu Przesyłowego. Zrzut ten możliwy jest bądź poprzez otwarcie zamknięć (stan wymuszony działaniem eksploatacyjnym), bądź samoczynnie, na skutek osiągnięcia przez zwierciadło ścieków rzędnej korony awaryjnego przelewu bocznego. Takie rozwiązanie pozwala na bezobsługowe dokonanie zrzutu awaryjnego [3].

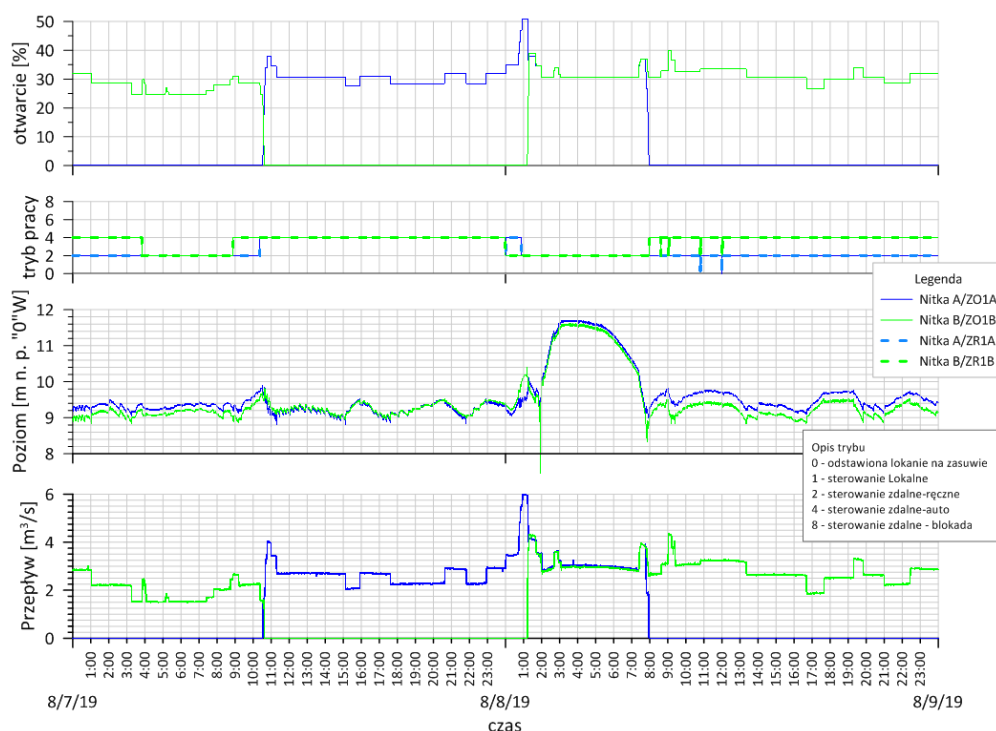


Rys. 2. Przekrój przez Komorę Wejściową. [2]

Początkowe, licząc od strony napływu ścieków, partie rurociągów syfonowych o długości ok. 40 m – aż do początku obudowy tunelu - wykonano z rur stalowych DN1600. Odcinki pomiędzy Komorą Krat a tunelem składają się z szeregu kolan i sekcji pionowych, których zadaniem jest pokonanie różnicy wysokości prawie 30 m pomiędzy strefą przepływu grawitacyjnego a najniższym punktem tunelu (rys. 2). Morfologia koryta Wisły (wysoki lewy brzeg), budowa geologiczna, dostępność terenu oraz względy wykonawcze wymusiły realizację nitek syfonowych o specyficznej geometrii, na którą składa się odcinek pionowy sprowadzający ścieki na głębokość 10 m poniżej średniego poziomu dna Wisły, następnie odcinek z przeciwnospadkiem 0,1% o długości ok. 800 m bezpośrednio pod korytem rzeki oraz odcinek z przeciwnospadkiem 3,3% o długości ok. 500 m doprowadzający ścieki do komory

Tunel wykonano w obudowie tubingowej o średnicy wewnętrznej 4,5 m, przy pomocy zawieszinowej tarczy wiercącej (było to pierwsze zastosowanie technologii TBM w Polsce). W dolnej części tunelu ułożono betonowe prefabrykаты, tzw. kołyski, których równa górna powierzchnia stanowiła podbudowę dla rurociągów ciśnieniowych: nitki A (południowej) i B (północnej). Przestrzeń pomiędzy rurociągami ostatecznie wypełniono pianobetonem, za wyjątkiem pierwszego odcinka o długości ok. 6 m tuż za połączeniem z częścią stalową, do wypełnienia którego wykorzystano beton. Nad rurociągami wykonano płytę żelbetową ułożoną na folii kubelkowej. Zadaniem żelbetowej płyty było dociążenie rurociągów w przypadku gdyby opróżniona została jedna z nitek, a poziom wody infiltrującej z zewnątrz tunelu doprowadziłby do zwiększonego wyporu. Folia kubelkowa umieszczona pod płytą żelbetową odprowadzała ewentualne przecieki do korytek ściekowych, poprowadzonych wzdłuż obu krawędzi płyty, w styku z obudową tunelu (rys. 4).

Ze względu na różnicę poziomów sieci kanalizacyjnej na lewym i prawym brzegu Wisły możliwy jest samoczynny (grawitacyjny) transport ścieków. Czynnikiem limitującym wielkość przepływu jest zdolność odbioru przez Oczyszczalnię Ścieków „Czajka”, która w zależności od ilości opadów przyjmuje ścieki z obu systemów kanalizacyjnych (lewobrzeżnego i prawobrzeżnego). Bezpośrednie sterowanie przepływami w obu nitkach odbywało się za pomocą zasuw regulacyjnych zlokalizowanych w Zakładzie „Świdarska” na końcu syfonu.



Rys. 5. Typowy przebieg pracy syfonu. [5]

W przypadku pogody bezopadowej wszystkie ścieki dopływające do Zakładu „Farysa” są przesyłane przez syfon do OŚ „Czajka”, z wykorzystaniem jednej nitki. Przepływy w ciągu doby zmieniają się od ok. 1,5 m³/s do ok. 3,75 m³/s. Przepustowość jednej nitki sięga prawie 7 m³/s, przy czym w okresach nocnych, w przypadku małej ilości ścieków, przepływ jest okresowo zatrzymywany. Związane jest to z koniecznością wymuszenia przepływu

o prędkości nie mniejszej niż samooczyszczająca rurociąg. Dopuszczenie dłużej trwającego, niewielkiego przepływu mogłoby prowadzić do gromadzenia się nadmiernej ilości osadów w syfonie, co wymagałoby dodatkowych czynności eksploatacyjnych. Procedura utrzymywania co najmniej minimalnej prędkości przepływu pozwala na samooczyszczanie się nitek syfonowych. Wymaganie dotyczące samooczyszczania się nitki syfonu prowadzi do naprzemiennego pracy obu nitek. Podczas pogody bezopadowej przełączenia następują co około 24 h.

W okresie opadów do pracy włączane są obie nitki, co daje wzrost przepustowości układu do $8,5 \text{ m}^3/\text{s}$, a w sytuacji opadów na lewym brzegu, przy jednoczesnym braku opadów w prawobrzeżnej Warszawie, istnieje możliwość zwiększenia przepływu do $10,85 \text{ m}^3/\text{s}$; ograniczenie to wynika z możliwości Oczyszczalni „Czajka”.

Typowy sposób pracy syfonu został pokazany na rys. 5. Widoczny jest dobowy cykl zmiany dopływu ścieków, naprzemienny system pracy nitek oraz współpraca obu nitek w okresie opadów deszczu.

3. Awaria w sierpniu 2019 – zdarzenie i skutki

Pierwszą oznaką awarii było gwałtowne zalanie tunelu ściekami, co zarejestrowała w dniu 27 sierpnia 2019 r., o godzinie 5.01 (czas kamery), pierwsza od strony Komory Wejściowej syfonu kamera nr 9 monitoringu wizyjnego [6]. Była ona zlokalizowana około 60 m (tubing nr 1030) od wejścia do tunelu od strony Zakładu „Farysa” i wskutek zalania ściekami została uszkodzona i przestała zapisywać sygnał o godzinie 5.10.12. Zdolność rejestrowania lub przesyłania obrazu utraciło także 6 kolejnych kamer o numerach od 10 do 15.

Ścieki w ciągu kilku minut wypełniły Komorę Wejściową Syfonu, a w tunelu sięgnęły do tubingu nr 450, czyli ok. 760 m od wlotu, o godzinie 5.41.17 [6]. Na filmach widoczne jest włączenie się świetlnej sygnalizacji zagrożenia gazowego siarkowodorem. Sygnał przekroczenia stężenia siarkowodoru został również zarejestrowany przez monitoring SCADA.

Stacyczne zwierciadło ścieków ustabilizowało się na rzędnej ok. 60,63 m n.p.m. (-16,97 m względem „Zera Wisły” = 77.60 m n.p.m.), tj. około 0,06 m powyżej zwornika stropu obudowy tubingowej tunelu w przekroju wlotowym (rzędna stropu w tubingu nr 1080 wynosi -17,03 m względem „Zera Wisły”, tj. 60,57 m n.p.m.). Wynika z tego, że tunel na długości ok. 60 m (do tubingu nr 1030) był całkowicie wypełniony ściekami, a ścieki po płycie żelbetowej dotarły na odległość ok. 765 m od wlotu, tj. do tubingu nr 450.

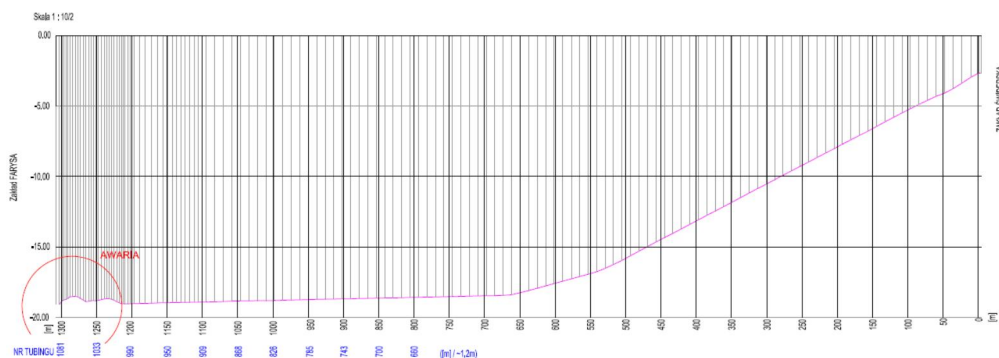
Zdecydowano o odpompowaniu ścieków z zalanej części tunelu, m.in. kierując się troską o stan szczelności obudowy tunelu, która jest przeznaczona przede wszystkim do przenoszenia obciążeń zewnętrznych, zaciskających połączenia między elementami pierścieni tubingowych. Wewnętrzne parcie ścieków w części redukuje naprężenia ściskające, które wobec niskich stanów Wisły i tak były mniejsze od przeciętnych. Do godzin wieczornych zwierciadło ścieków obniżono do poziomu utrzymującego je w Komorze Wejściowej, poniżej pomostów umożliwiających dostęp do tunelu.

Oględziny obiektu przeprowadzono około północy z 27 na 28 sierpnia 2019 r. Ze względów bezpieczeństwa oględziny ograniczono do kilkudziesięciometrowego odcinka tunelu od strony Komory Wejściowej [5].

Stwierdzono:

- uniesienie i pofalowanie powierzchni płyty żelbetowej przykrywającej obetonowane kolektory (rys. 6),
- przemieszczenia względne w dylatacjach płyty żelbetowej,
- uszkodzenia toru jezdnego wózka szynowego,
- rozerwanie połączenia płyty z blokiem betonowym u wlotu do tunelu,

- zniszczenia koryt odwadniających, zlokalizowanych obustronnie na obrzeżach płyty, przy obudowie tubingowej,
- wyniesione spod płyty (do Komory Wejściowej) fragmenty rur GRP (tylko po stronie nitki południowej A), pianobetonu i prefabrykatów, z których wykonano korytka odwadniające (fragmenty pianobetonu, unoszone przez ścieki były rozproszone na większej powierzchni),
- pustą studzienkę na pompę odwadniającą system drenażowy,
- wyrwany czujnik poziomu wody w pierwszym piezometrze otwartym,
- przemieszczone i uszkodzone półki kablowe, zlokalizowane na południowej ścianie obudowy tubingowej,
- uszkodzenia instalacji oświetleniowej.



Rys. 6. Niweleta płyty żelbetonowej wzdłuż osi podłużnej, stan 28.08.2019 [5].

W głębi tunelu, na przemieszczonej płycie leżały okruchy pianobetonu, który osadził się tam po odpompowaniu ścieków. W obrębie Komory Wejściowej, w pomieszczeniu wyodrębnionym ze względu na system wentylacji tunelu, stwierdzono znaczne ilości zanieczyszczonego osadami ściekowymi gruzu, wyrzuconego spod uniesionej płyty żelbetonowej.

We wczesnych godzinach rannych dnia 28 sierpnia 2019 r., podczas rutynowego przestoju w przesyle ścieków (gromadzenie ścieków w okresie zmniejszonego ich dopływu) ujawniła się nieszczelność nitki B syfonu. Z tego powodu syfon, a w konsekwencji Układ Przesyłowy, utracił swoją funkcjonalność. Zgodnie z instrukcją obsługi komory krat [4], wobec braku możliwości przesyłu i ograniczonych możliwości ich retencjonowania w układzie dopływowym, rozpoczęto ich zrzut do Wisły.

Już 30 sierpnia 2019 r. przystąpiono do usuwania uszkodzonej płyty żelbetonowej, począwszy od Komory Wejściowej, na wstępnie określonym odcinku 80-100 metrów, sukcesywnie odsłaniając uszkodzone rurociągi syfonowe. Prace te umożliwiły dotarcie do miejsca rozszczelnienia rurociągu A, udokumentowanie stanu tego fragmentu rurociągu oraz pobór próbek do dalszych oględzin i badań. Stwierdzono, że nitka A, począwszy od opaski montażowej, czyli uszczelnienia styku rury GRP z rurą stalową, zbudowana była z krótkiego (ok. 65 cm) odcinka rury GRP (dalej zwanego Łącznikiem), przycinanej (dopasowywanej) na budowie, przy czym docinany koniec był umieszczony w opasce Teekay Axiflex, tj. od strony rury stalowej. Dalej rurociąg tworzył również przycinany odcinek rury GRP o długości ok. 240 cm (analogicznie zorientowany stroną przycinaną ku Komorze Wejściowej). Kolejne odcinki (odliczając je w stronę brzegu praskiego i do zasięgu rozbiórki) miały zakończenia fabryczne i dwie typowe długości: 300 cm lub 600 cm. Podczas rozbiórki uszkodzonych odcinków rurociągów szczególną uwagę zwrócono na miejsca połączenia przewodów z dwóch różnych materiałów. Analiza zjawisk zachodzących w tym miejscu jest przedmiotem niniejszej publikacji. Pominięto

natomiast opis wielu wtórnych uszkodzeń obu rurociągów spowodowanych wpływem silnego strumienia ścieków z uszkodzonego miejsca w nitce A.



Rys. 7. Odsłonięte miejsca połączeń rurociągów z rur GRP z rurociągami stalowymi. Po prawej – nitka A i rozerwany rurociąg z rury GRP (Łącznik) [5].

4. Analiza połączenia stal-GRP

Prowadzone w ramach usuwania skutków awarii prace rozbiórkowe uszkodzonego odcinka syfonu, umożliwiły odsłonięcie miejsca połączenia rurociągów stalowych z rurociągami z GRP i rozpoznanie rzeczywistej budowy tego fragmentu przejścia syfonowego. Zbiorczy efekt prac inwentaryzacyjnych przedstawiono na rysunku 6.

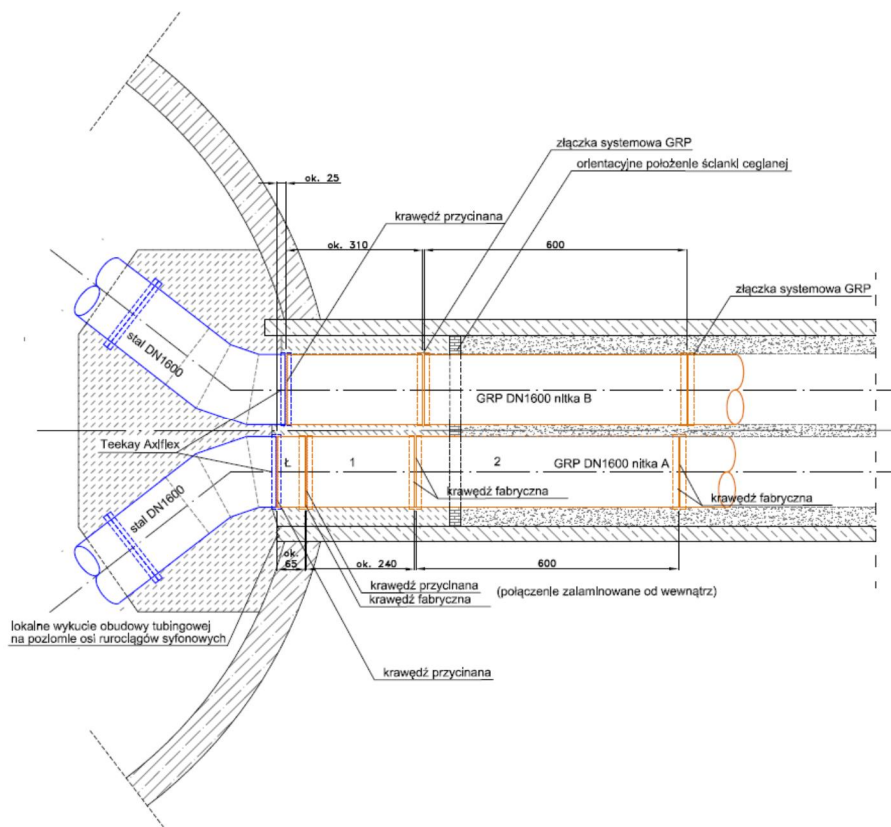
Na rysunku 8 zaznaczono kolorem niebieskim rurociągi stalowe z połączeniami kołnierzowymi i spawanymi. Kolor pomarańczowy wskazuje odcinki wykonane w technologii GRP. Uwidoczniono różnice rozwiązań w nitkach A i B:

- Ściana tunelu (obudowa tubingowa) w rejonie wejścia do komory od strony nitki A została podcięta/rozkuta na wysokości osi rurociągów syfonowych [7]);
- Rurociągi stalowe połączone z rurociągami GRP za pomocą opasek Teekay Axiflex, ze względu na brak miejsca opaski są względem siebie przesunięte o około 25 cm, w przypadku nitki A odcinek stalowy kończy się wcześniej (patrzac zgodnie z kierunkiem przepływu);
- W nitce A, pomiędzy rurociągiem stalowym a właściwymi sekcjami rur GRP wprowadzono krótki Łącznik, o długości około 65 cm, Łącznik miał krawędź przycinaną od strony napływu ścieków i fabryczną z drugiej strony;
- Pierwsze segmenty rur GRP w obu nitkach zostały docięte do niezbędnego wymiaru, w nitce A jest to odcinek o długości około 240 cm;
- Połączenie między Łącznikiem a pierwszym segmentem w nitce A zostało od wewnątrz zalaminowane.

Na tym odcinku tunelu rurociągi syfonowe obetonowano; zasięg betonu wyznacza murek ceglany, zlokalizowany na początku drugiego segmentu GRP (rys. 8).

Na rysunku 8 zaznaczono kolorem niebieskim rurociągi stalowe z połączeniami kołnierzowymi i spawanymi. Kolor pomarańczowy wskazuje odcinki wykonane w technologii GRP. Uwidoczniono różnice rozwiązań w nitkach A i B:

- Ściana tunelu (obudowa tubingowa) w rejonie wejścia do komory od strony nitki A została podcięta/rozkuta na wysokości osi rurociągów syfonowych [7];
- Rurociągi stalowe połączone z rurociągami GRP za pomocą opasek Teekay Axiflex, ze względu na brak miejsca opaski są względem siebie przesunięte o około 25 cm, w przypadku nitki A odcinek stalowy kończy się wcześniej (patrzac zgodnie z kierunkiem przepływu);
- W nitce A, pomiędzy rurociągiem stalowym a właściwymi sekcjami rur GRP wprowadzono krótki Łącznik, o długości około 65 cm, Łącznik miał krawędź przycinaną od strony napływu ścieków i fabryczną z drugiej strony;
- Pierwsze segmenty rur GRP w obu nitkach zostały docięte do niezbędnego wymiaru, w nitce A jest to odcinek o długości około 240 cm;
- Połączenie między Łącznikiem a pierwszym segmentem w nitce A zostało od wewnątrz zalaminowane.



Rys. 8. Szkic obrazujący sposób wykonania połączenia rur stalowych z rurami GRP wykonany na podstawie dokumentacji fotograficznej, pomiarów i obserwacji towarzyszących robotom rozbiórkowym [7].

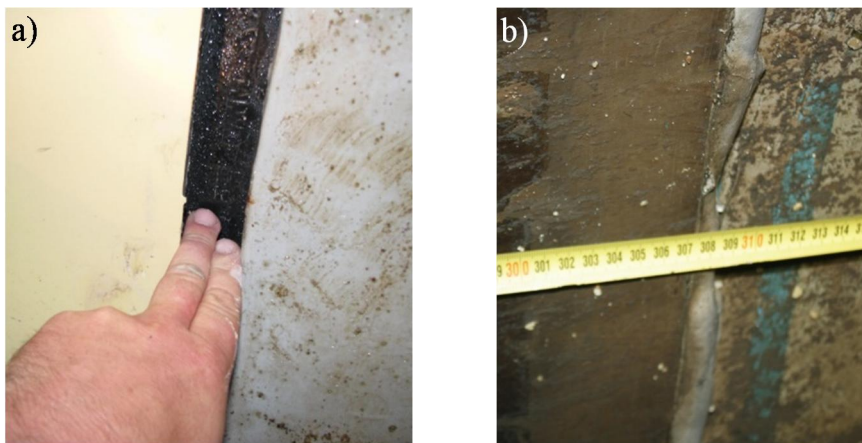
Na tym odcinku tunelu rurociągi syfonowe obetonowano; zasięg betonu wyznacza murek ceglany, zlokalizowany na początku drugiego segmentu GRP (rys. 8).

W miejscu połączenia Łącznika z rurą stalową wystąpiła nominalna różnica wewnętrznych średnic rury stalowej i z GRP o wielkości około 14 mm (rura z GRP miała mniejszą średnicę), przy czym zewnętrzne średnice rur wyrównano przez pogrubienie końcowego odcinka rurociągu stalowego pierścieniową nakładką. W stanie faktycznym różnice między położeniem wewnętrznych powierzchni rur zmieniały się w przekroju połączenia wzdłuż obwodu.

Wynika to z podatności rur GRP na tak zwaną owalizację i to już pod wpływem ciężaru własnego. Do tego dochodzą odkształcenia kołowości w przekroju poprzecznym wywołane dopasowywaniem opaski Teekay Axiflex oraz zmianą sztywności rury GRP będącą wynikiem starzenia kompozytu (najintensywniejsze w kilku pierwszych latach życia). W efekcie na pewnych odcinkach obwodu powierzchnia wewnętrzna rury GRP licowała ze światłem rury stalowej, na innych przesłaniała to światło, a w jeszcze innych była przemieszczona na zewnątrz, poza światło rury stalowej. Niewątpliwie komplikowało to warunki przepływu ścieków, powiększając intensywność i zasięg zaburzeń natury hydraulicznej.

Szczelina pomiędzy rurami: stalową i GRP była najprawdopodobniej wypełniona kitem. Chociaż w stanie poawaryjnym nie stwierdzono w nitce A obecności elastycznego kitu w szczelinie między rurami: stalową i GRP, w przeciwieństwie do stanu w rurociągu B, to jest prawie pewne, że był on obecny także w nitce A. Domniemanie to wynika z przeznaczenia kitu w tych miejscach obu rurociągów (nitki A i B), tj. chęci złagodzenia przejścia między rurami o różnych średnicach i ograniczenia w ten sposób turbulencji przepływu ścieków.

Na rys. 9a pokazano szczelinę w nitce A z okresu montażu (maj 2012), jeszcze przed umieszczeniem kitu, a na rys. 9b stan szczeliny w nitce B po awarii (sierpień 2019). Różnica szerokości szczelin może być oszacowana na około 2 cm (większa w nitce A). Szersze pasmo kitu, nakładane w kilku fazach, było bardziej wyeksponowane na oddziaływanie silnych w tym miejscu turbulencji strumienia ścieków (wysysanie). Początkiem sekwencji zdarzeń prowadzących do awarii nitki A mogło być wyniesienie kitu z tego miejsca.



Rys. 9. Połączenie rurociągu stalowego z GRP, a) nitka A, stan z 8 maja 2012 (przed uruchomieniem), b) nitka B, stan z 29 sierpnia 2019 (po awarii).

5. Oddziaływania hydrodynamiczne

5.1. Oszacowanie wartości reakcji hydrodynamicznych

W związku z przepływem ciśnieniowym ścieków w rurociągach syfonowych i znacznymi prędkościami ruchu, w układzie występują siły hydrodynamiczne oddziałujące na rurociąg i jego podpory, zwłaszcza w miejscach zmiany kierunku przepływu.

Siły hydrodynamiczne są ściśle związane z chwilowymi wartościami ciśnienia i prędkości. W konsekwencji stan obciążenia będzie dynamiczny. Obliczenia, których wyniki zaprezentowano poniżej, wykonano klasyczną metodą wynikającą z zasady zachowania pędu, dla sytuacji stałego obciążenia w czasie. Wykorzystano wzór:

$$\vec{P}_1 + \vec{P}_2 + \vec{G} + \vec{R} = \rho \cdot Q \cdot (\vec{v}_2 - \vec{v}_1) \quad (1)$$

gdzie:

- P_1 – suma sił parcia w przekroju wlotowym, wielkość wektorowa,
- P_2 – suma sił parcia w przekroju wylotowym, wielkość wektorowa,
- G – ciężar cieczy, wielkość wektorowa,
- R – siła reakcji hydrodynamicznej, wielkość wektorowa,
- ρ – gęstość cieczy,
- Q – przepływ,
- v_1 – prędkość w przekroju wlotowym, wielkość wektorowa,
- v_2 – prędkość w przekroju wylotowym, wielkość wektorowa.

Tablica 2. Zestawienie wyników obliczeń wartości sił hydrodynamicznych [kN] [6]

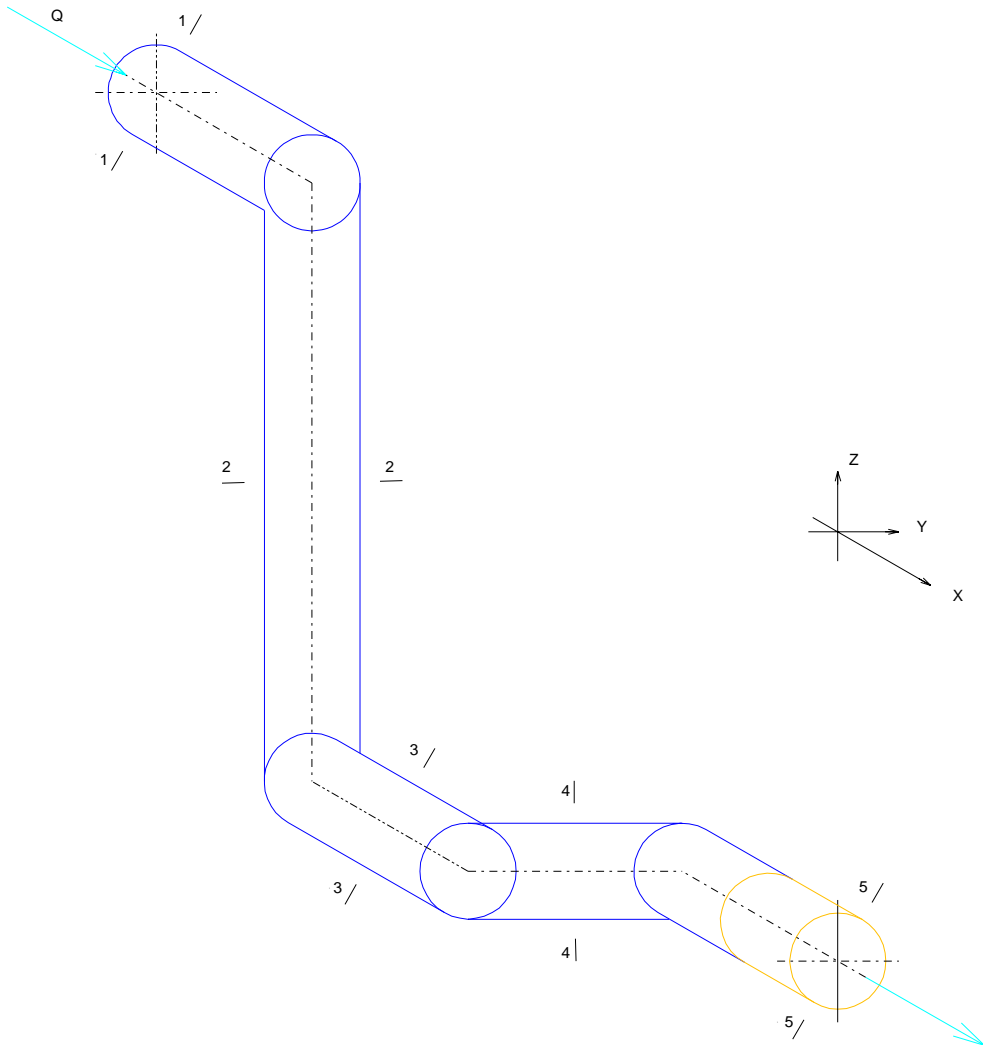
Kierunek działania siły	Odcinek rurociągu (wg rys. 10)			
	1-1 – 2-2	2-2 – 3-3	3-3 – 4-4	4-4 – 5-5
	Przepływ $Q = 1,5 \text{ m}^3/\text{s}$			
P_x	33	-588	125	-125
P_y	0	0	-362	362
P_z	-156	-766	-69	-93
	Przepływ $Q = 3,5 \text{ m}^3/\text{s}$			
P_x	38	-588	125	-124
P_y	0	0	-362	362
P_z	-154	-767	-69	-93
	Przepływ $Q = 6 \text{ m}^3/\text{s}$			
P_x	68	-606	129	-127
P_y	0	0	-373	373
P_z	-133	-789	-69	-93

Zwraca uwagę moment sił powodujący obrót rurociągu na wejściu do tunelu. Odcinek stalowy zamocowany jest w konstrukcji żelbetowej (podpora stała). Natomiast odcinek rurociągu z rur GRP, połączony opaską Teekay Axiflex z rurociągiem stalowym (całość pogrążona w betonie wypełniającym), był narażony na oddziaływanie sił hydrodynamicznych. Uszkodzenia zinwentaryzowane podczas prac rozbiórkowych, pokazane na rys. 7 wskazują na obrót Łącznika i zsuniecie opaski, zgodnie ze zwrotem momentu sił hydrodynamicznych.

Składowa pozioma P_y siły hydrodynamicznej działająca między przekrojami 4-4 oraz 5-5, na odcinku o długości około 5,15 m (rys. 10), została oszacowana na 373 kN (przy natężeniu przepływu ścieków 6 m³/s. Przyjmując geometrię łuku i Łącznika o długości około 65 cm można w uproszczeniu (i z nadmiarem) określić wartość poziomej składowej siły hydrodynamicznej działającej na sam Łącznik (proporcjonalnie do jego długości: 0,65/5,15), co daje wartość 47,1 kN.

Należy zauważyć, że zmiana kierunku rurociągu stalowego przed jego połączeniem z rurociągiem GRP została zrealizowana przez wykonanie dwóch segmentów z rury stalowej, o łącznym zwrocie 38° – rys. 8. Dwie skoncentrowane (skokowe) zmiany kierunku przepływu (zamiast równomiernej po łuku kołowym) powodowały dodatkowe zaburzenia przepływu i wydłużenie strefy jego uspokojenia (wyrównania ciśnień w przekrojach poprzecznych strumienia ścieków). Intensyfikowało to oddziaływanie sił hydrodynamicznych na Łącznik. Ten wprawdzie był nominalnie już na prostoliniowym odcinku osi rurociągu GRP (teoretycznie poza łukiem), ale oddziaływanie zaburzeń przepływu strumienia przenosiło się na prostoliniowy odcinek rurociągu na długość – według literatury przedmiotu – co najmniej kilkunastu metrów (do około 10-ciokrotności średnicy rury) [8, 9].

Do zaburzeń przepływu wywołanych zmianą kierunku strumienia ścieków należy dodać silne turbulencje i związane z nimi pulsacyjne wahania ciśnienia spowodowane zróżnicowaniem średnic rury stalowej i z GRP oraz bardzo prawdopodobny, wzmagający te turbulencje ubytek kitu ze szczeliny między rurą stalową i Łącznikiem.



Rys. 10. Schemat układu nitki A z zaznaczonymi przekrojami obliczeniowymi. Kolorem niebieskim oznaczono odcinek stalowy, pomarańczowym odcinek wykonany z GRP

Ostatni odcinek rurociągu stalowego w nitce A został skrócony względem projektu i stanu w nitce B (nie zaznaczono tego na przywołanych wcześniej rysunkach z dokumentacji powykonawczej, ale stwierdzono i udokumentowano to po awarii). Jak można się domyślać wynikało to z potrzeby rozmieszczenia opasek Teekay Axiflex na nitce A i B w różnych przekrojach poprzecznych, gdyż ich umieszczenie w jednym przekroju nie dawało możliwości właściwego montażu (brak miejsca wywołany bliskością rurociągów A i B). Przesunięcie

miejsca łączenia rurociągu GRP z rurociągiem stalowym w nitce A wyniosło około 25 cm w kierunku Komory Wejściowej.

Skrócenie rurociągu stalowego w nitce A zrealizowano najprawdopodobniej przez odcięcie ostatniego segmentu łuku, jego skrócenie ukośnym cięciem od strony poprzedzającego segmentu stalowego i ponowne dospawanie w dotychczasowym przekroju łączenia segmentów. Można domniemywać, że operacje te zostały wykonane w warunkach placu budowy i nie można wykluczyć pewnych niedokładności. Mogły one sprawić, że oś ostatniego segmentu rury stalowej nie była finalnie równoległa do osi rurociągu z GRP. Być może z tego powodu sąsiadujący z rurociągiem stalowym fragment rurociągu GRP został podzielony na Łącznik (o długości ok. 65 cm) i segment nr 1 (rys. 8) o długości ok. 240 cm, chociaż cały ten fragment rurociągu można było wykonać (przyciąć) z jednego segmentu o długości 6 m.

W takiej sytuacji złączka systemowa między Łącznikiem i segmentem nr 1 dawała lepszą możliwość dopasowania łączonych odcinków rurociągu, z niewielką korektą kątową. Być może z tego powodu złącze to zostało od wewnątrz zalaminowane.

Opisane wyżej działania de facto włączały Łącznik do łuku na nitce A i zwiększały intensywność i zasięg zaburzeń hydraulicznych wynikających ze zmiany kierunku przepływu ścieków. Siły hydrodynamiczne działające na Łącznik były większe niż gdyby opisanej operacji skrócenia rurociągu stalowego nie wykonano w opisany sposób.

Przepływ ścieków generuje także składową pionową siłę hydrodynamiczną, w znacznej mierze uwarunkowaną ciężarem ścieków wypełniających Łącznik. Przy przepływie równym $6 \text{ m}^3/\text{s}$, oszacowano ją na 93 kN (tab. 2), co daje 11,7 kN na długości Łącznika.

Wzdłuż osi rurociągu działa na Łącznik wypadkowa siła od tarcia między strumieniem ścieków a wewnętrzną powierzchnią rury. Siła działa w kierunku przepływu ścieków. Ze względu na dużą średnicę rurociągu, nieznaczną chropowatość jego powierzchni wewnętrznej oraz niewielką długość Łącznika opory liniowe przepływu można zaniedbać.

W tym miejscu należy wyjaśnić, że składowa osiowa siła hydrodynamiczna (tab. 2) jest efektem zmiany kierunku przepływu (łuku) i próbuje ona przemieścić analizowany odcinek rurociągu w kierunku przeciwnym niż przepływ (do Komory Wejściowej). Ze względu na charakter podatnego połączenia (opaska Teekay Axiflex) sztywnej i obetonowanej rury stalowej (podpora stała) z Łącznikiem można przyjąć, że oddziaływanie to nie przenosiło się na Łącznik.

5.2. Siły hydrodynamiczne działające na Łącznik

W dalszej analizie oddziaływań natury hydraulicznej wpływających na Łącznik uwzględniono (rys.11):

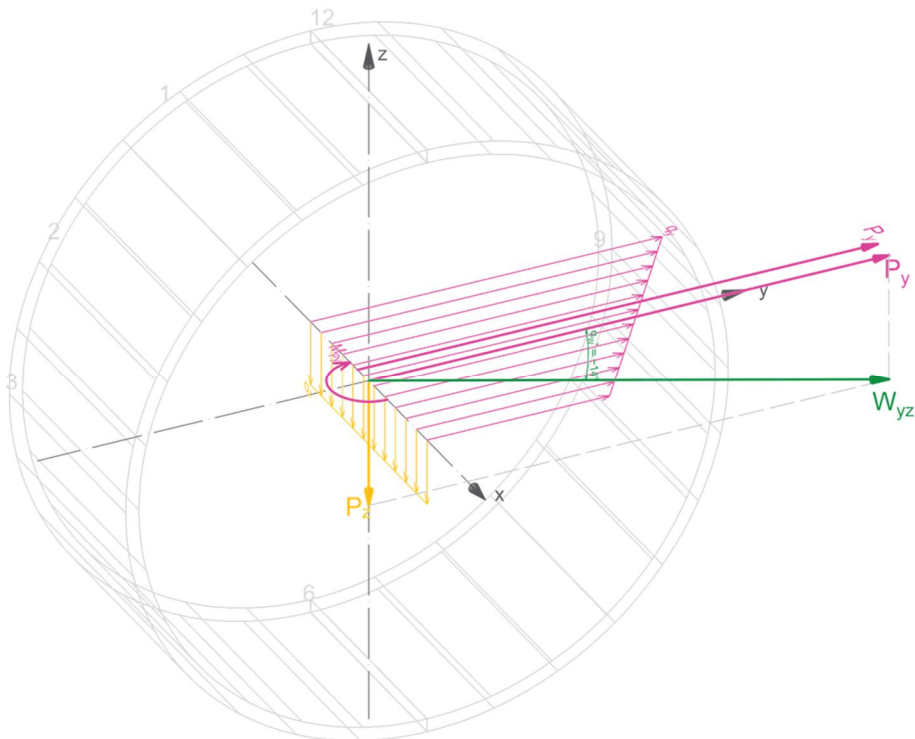
- siły pionowe od ciężaru przepływających ścieków, skierowane w dół; w niniejszym wywodzie można pominąć nierównomierność rozkładu na długości Łącznika oddziaływań prowadzących do powstania siły pionowej i sprowadzić ją do środka ciężkości Łącznika,
- poziome siły hydrodynamiczne (od zmiany kierunku ruchu ścieków), skierowane w kierunku nitki B, malejące na długości Łącznika w kierunku przepływu ścieków; wypadkowa poza środkiem ciężkości Łącznika.

Zmienność ciśnień hydrodynamicznych generujących siłę poziomą jest większa, co sprawia, że na długości Łącznika ciśnienia te (większe od strony rury stalowej, mniejsze od strony kolejnego segmentu GRP) dają dodatkowy moment starający się obrócić Łącznik zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara (jeśli spojrzymy na układ w planie).

Nierównomierność rozkładu ciśnień hydrodynamicznych sprawia, że wypadkowa oddziaływań poziomych i pionowych w kolejnych przekrojach na długości Łącznika zmienia nie tylko swoją wartość, ale i kierunek. Idąc zgodnie z przepływem ścieków kąt, jaki tworzy

siła wypadkowa z płaszczyzną poziomą, rośnie (dla średnich wartości sił działających na Łącznik i pokazanych na rys. 11 wynosi on około 14 stopni).

Pozioma siła hydrodynamiczna pochodzi od bezwładności strumienia ścieków, kiedy zmienia się kierunek przepływu. Siła dociska ściankę rury GRP do betonowego podłoża. Po przeciwnej stronie, na powierzchni wewnętrznej Łącznika występują rozległe strefy obniżonych ciśnień, a właściwie obszary o obniżonym i zmieniającym się pulsacyjnie ciśnieniu, co wynika z zaburzeń przepływu w miejscu kolana, łączenia rur różnego rodzaju (także o różnych sztywnościach) i o nie jednakowych średnicach. Z całą pewnością zmiany (pulsacje) ciśnienia są intensywne i szybko zmienne, zwłaszcza przy większych prędkościach przepływu. Oddziaływania te w kontakcie z rurą GRP, o budowie warstwowej, sprzyjają delaminacji rury GRP, zwłaszcza jeśli delaminacja zostanie wcześniej zainicjowana, na przykład przez miejscowy docisk nierówno przeciętego Łącznika do gładkiej i twardej powierzchni doczołowej rury stalowej lub wcześniejsze uszkodzenie (fabryczna wada materiałowa lub uszkodzenie w trakcie przycinania albo montażu Łącznika) albo penetrację ścieków w otwartą przez cięcie strukturę rury GRP.



Rys. 11. Układ sił hydrodynamicznych działających na Łącznik - siły wynikające z obliczeń. Objaśnienia: x, y, z – współrzędne układu odniesienia (zwrot osi x zgodny z kierunkiem przepływu ścieków), q_y, q_z – obciążenie ciągłe od oddziaływań hydrodynamicznych odpowiednio: poziomych i pionowych, P_y, P_z – wypadkowe oddziaływań q_y, q_z , P'_y – przesunięcie siły P_y do środka ciężkości Łącznika, M_{P_y} – moment obracający wynikający z przesunięcia siły P_y , W_{yz} – wypadkowa sił P_y i P_z .

Siły natury hydrodynamicznej można oszacować także na podstawie obrazu rozerwania Łącznika, czyli jako wynik procedury określanej mianem analizy wstecz.

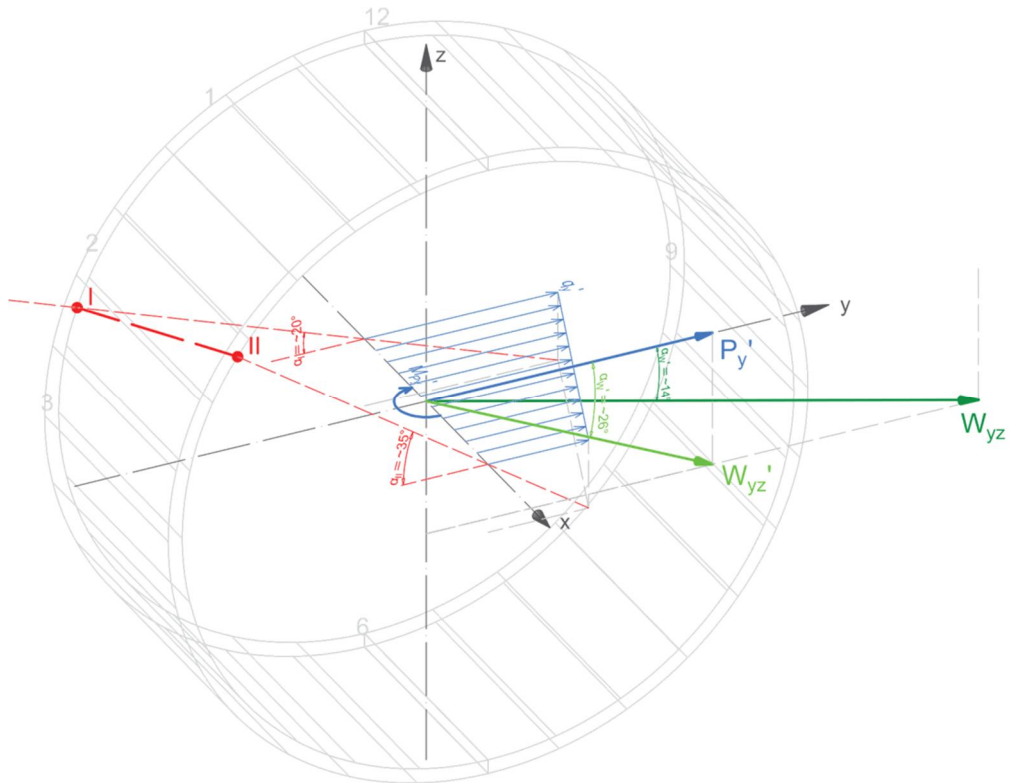
Na rys. 12 – fotografii pokazującej wewnętrzną powierzchnię Łącznika w miejscu rozerwania – zaznaczono lokalizację pęknięcia i jego orientację.



Rys. 12. Widok na wewnętrzną powierzchnię Łącznika w miejscu rozerwania; na górze czoło Łącznika od strony rury stalowej (20191216_142242).

Na rys. 13, na poboczniczy Łącznika, czerwoną grubą linią kreskową zaznaczono przebieg pęknięcia z rys. 12, a następnie wyznaczono kierunki wypadkowych oddziaływań poziomych i pionowych w skrajnych punktach pęknięcia. Wyznaczono kąty tych kierunków względem płaszczyzny xy , a następnie – przyjmując ciągłe i stałe obciążenie pionowe od siły hydrodynamicznej $qz = 11,7/0,65 = 18 \text{ kN/mb}$ wyliczono skrajne rzędne ciągłego hydrodynamicznego obciążenia poziomego qy (49,5 kN/mb od strony rury stalowej oraz 25,7 kN/mb od strony segmentu nr 1). Przyjmując liniowy rozkład tego oddziaływania obliczono wartość poziomej siły hydrodynamicznej działającej na Łącznik. Uzyskana wartość $P_y' = 24,4 \text{ kN}$ jest znacząco mniejsza od wartości siły P_y oszacowanej z proporcji długości Łącznika i obliczeniowego odcinka rurociągu między przekrojami 4-4 i 5-5. Zmienia to wartość i kierunek siły wypadkowej; kąt α wynosi ok. 26° (rys. 13).

Wynik obliczeń, wychodzących od lokalizacji uszkodzenia (rodzaj tzw. analizy wstecz), jest zapewne bliższy rzeczywistości niż oszacowanie z „proporcji długości”, gdyż siła hydrodynamiczna na łuku zmienia się wraz z krzywizną od zera do maksimum na dwusiecznej kąta zwrotu łuku i później analogicznie spada, przy czym zaburzenia przepływu propagują się jeszcze na odcinek rurociągu za łukiem. Tymczasem oszacowanie z „proporcji długości” zakłada równomierność oddziaływania na całym odcinku obliczeniowym (łuku), co wobec segmentowej budowy tego fragmentu rurociągu stalowego jest tym mniej zgodne z rzeczywistością.



Rys. 13. Układ sił hydrodynamicznych działających na Łącznik – siły wynikające z analizy wstecz. Objaśnienia: x, y, z – współrzędne układu odniesienia (zwrot osi x zgodny z kierunkiem przepływu ścieków), q_y, q_z – obciążenie ciągłe od oddziaływań hydrodynamicznych odpowiednio: poziomych i pionowych, P_y, P_z – wypadkowe oddziaływań q_y, q_z , P'_y – przesunięcie siły P_y do środka ciężkości Łącznika, M_{P_y} – moment obracający wynikający z przesunięcia siły P_y , W_{yz} – wypadkowa sił P_y i P_z , α – charakterystyczne kąty (opis w tekście).

6. Dodatkowe potencjalne oddziaływania

Pozioma siła hydrodynamiczna wywołuje moment, który dąży do obrotu Łącznika w płaszczyźnie poziomej w kierunku zgodnym z kierunkiem ruchu wskazówek zegara (gdy patrzeć na układ z góry).

Ponieważ płyta żelbetowa była wykonana na przekładce z folii kubełkowej (poziomy drenaż warstwowy) można przyjąć, że docisk płyty do rury GRP nie musiał być istotnym ograniczeniem dla obrotu Łącznika.

Jednak st

osunkowo krótki Łącznik (ok. 0,65 m) został połączony złączką systemową z dłuższym segmentem nr 1 rury GRP o długości około 2,4 m i połączenie to zostało od środka rurociągu zalaminowane. O ewentualnym obrocie Łącznika można więc mówić dopiero przy założeniu, że sztywność jego połączenia z segmentem nr 1 znacząco się zmniejszyła. Można więc założyć, że opisane wcześniej oddziaływania hydrodynamiczne doprowadziły również do ścięcia owego zalaminowania. Jeśli tak było, to w chwili odspojenia laminatu zmieniła się sztywność

połączenia Łącznika z segmentem nr 1 na bardziej podatne, a więc bardziej sprzyjające poziomemu obrotowi Łącznika pod wpływem momentu skręcającego od siły poziomej.

Obrotowi Łącznika przeciwdziałało obetonowanie. Nawet jeśli założyć, że wokół pobocznic Łącznika wytworzyła się przestrzeń dla obrotu, to pozostawałby on w granicach, na jakie pozwoliłyby elastyczne uszczelki w złączce systemowej i w opasce Teekay Axiflex.

Ścięcie (odspojenie) laminatu w połączeniu Łącznika z segmentem nr 1 i wynikające z tego rozszczelnienie przestrzeni między rurami pod złączką systemową musiało się łączyć z przedostaniem się ścieków pod laminat i wywołaniem dodatkowego rozporu pomiędzy Łącznikiem a segmentem nr 1. Ze względu na niewielką długość Łącznika, tarcie o beton na jego zewnętrznej pobocznicy nie było zbyt duże i Łącznik mógł przesunąć się pod wpływem tego impulsu ciśnieniowego w kierunku rury stalowej zwiększając miejscowy docisk odcinka rury GRP (Łącznik) do rury stalowej, czego warunkiem koniecznym jest wcześniejsze wyerodowanie kitu ze szczeliny między rurami. Opisana sekwencja uzasadniłaby zwężenie szczeliny między Łącznikiem i rurą stalową (vide rys. 9.a), gdyż sam obrót wydaje się mało prawdopodobny (obetonowanie!) i niewystarczający, aby taki docisk spowodować.

Opisane powyżej procesy (jeśli wystąpiły) nie musiały skupić się w czasie tuż przed awarią. Być może niektóre z nich, jak np. zniszczenie laminatu między Łącznikiem i segmentem nr 1, były skutkiem wtórnym rozszczelnienia nitki A (druga faza awarii). Podobnie idelaminacja nie musiała być inicjowana przez skoncentrowany docisk Łącznika do rury stalowej (destrukcyjna rola nierówności cięcia), ale bezpośrednio wynikać z otwarcia struktury rury GRP w miejscu jej przycięcia na penetrację ścieków lub być wyłącznie skutkiem zmęczeniowego oddziaływania pulsacji ciśnienia po wewnętrznej stronie łuku wskutek oddziaływań hydrodynamicznych.

7. Podsumowanie

W świetle przedstawionych analiz za konieczne i wystarczające oddziaływania prowadzące do rozwarstwienia i rozerwania Łącznika można uznać – występowanie na długości Łącznika, po wewnętrznej stronie łuku rurociągu, strefy szybkozmiennych obniżen ciśnienia ścieków, wynikających z zaburzeń przepływu ścieków, skutkujących pulsacyjnym oddziaływaniem na wewnętrzne warstwy rury GRP i w konsekwencji (zmęczenie materiału) jej delaminacją. Wpływ sił hydrodynamicznych znajduje potwierdzenie w zgodności trajektorii rozerwania (pęknięcia) Łącznika z lokalizacją najintensywniejszych pulsacji ciśnienia (naprzeciw maksymalnych ciśnień po zewnętrznej stronie łuku) – rys. 13.

Za wysoce prawdopodobne okoliczności (oddziaływania) poprzedzające i/lub inicjujące delaminację można uznać:

- wyniesienie kitu z połączenia Łącznik – rura stalowa, co ułatwiło dostęp ścieków do ciętej, czołowej powierzchni rury GRP, jak również stworzyło możliwości wystąpienia docisku GRP do stali,
- otwarcie warstwowej struktury kompozytu, wskutek przycinania rury GRP, na penetrację ścieków, zwłaszcza w miejscach przecięcia włókien szklanych;
- nierówności powierzchni czołowej Łącznika po cięciu rury w warunkach budowy, sprzyjające koncentracji naprężeń wynikających z możliwego nacisku Łącznika na czołową powierzchnię rury stalowej,
- zniszczenie laminatu w połączeniu Łącznika z segmentem nr 1, co zwiększyło podatność tego połączenia na obrót Łącznika i/lub przesunięcie Łącznika w kierunku rury stalowej,
- oddziaływania hydrodynamiczne na Łącznik skutkujące momentem obracającym Łącznik w płaszczyźnie zbliżonej do poziomej i generujące nierównomierny nacisk Łącznika na czoło rury stalowej.

Za mało prawdopodobne, a na pewno niemożliwe dziś do jednoznacznego wykazania, należy uznać wstępne uszkodzenie Łącznika przy jego montażu, jako potencjalnie inicjujące delaminację GRP. Analogicznie należy potraktować hipotezę o uderzeniu w Łącznik ciała stałego niesionego w strumieniu ścieków. Także potencjalnie możliwa wada materiałowa (fabryczna) rury GRP jest trudna do wykazania wobec poawaryjnego (pozniszczeniowego) stanu Łącznika.

Przedstawiona analiza przypadku oddziaływania sił hydrodynamicznych wskazuje na istotną ich rolę w możliwej inicjacji awarii rurociągu syfonowego w Układzie Przesyłowym ścieków w Warszawie w 2019 r. Przyczyną wywołującą te oddziaływania była zmiana kierunku przepływu ścieków, a dodatkowo różnica średnic łączonych rur wzmagająca turbulencje przepływu. Te ostatnie, dynamiczne i szybkozmienne oddziaływania, trudne do ilościowego określenia, mogły być szczególnie destrukcyjne dla rurociągu z GRP, o warstwowej budowie.

Opisane zjawiska hydrauliczne, charakterystyczne dla kolan rurociągów ciśnieniowych, nie miałyby zapewne znaczenia, gdyby rurociąg stalowy został wprowadzony głębiej do tunelu, a jego połączenie z rurą GRP znalazło się poza strefą intensywnych turbulencji przepływu.

Literatura

1. Raport MPWiK za 2017 rok <https://www.mpwik.com.pl/view/raporty-roczne>, dostęp 12 lutego 2022.
2. Układ Przesyłowy ścieków do Oczyszczalni Ścieków „Czajka” w Warszawie, Odcinek II, Projekt architektoniczno-budowlany, Tom 2.2 Syfon pod Wisłą. Warszawa 2009, Dokumentacja powykonawcza. 143/6. Plik pdf datowany na wiosnę (luty – kwiecień) 2013.
3. Instrukcja obsługi i konserwacji. Komora wejściowa, tunel i syfony, komora wyjściowa, komora rozprężna, komora połączeniowa, i komora pomiarowa. Maj 2013.
4. Instrukcja obsługi i konserwacji. Budynek krat. Maj 2013.
5. Kledyński Z., Kodura A., Ekspertyza techniczna dotycząca przyczyn awarii w rurociągów syfonu w tunelu pod Wisłą, Politechnika Warszawska, WIBHiŚ, Warszawa, 19 czerwca 2020 r.
6. Monitoring wizyjny tunelu. Filmy z kamer nr 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 z 27 sierpnia 2019 r., godz. od 5 do 6 rano.
7. Kledyński Z., Kodura A., Ekspertyza techniczna dotycząca przyczyn awarii w rurociągów syfonu w tunelu pod Wisłą, POSTSCRIPITUM, Politechnika Warszawska, WIBHiŚ, Warszawa, wrzesień 2021 r.
8. Freimann R., Hydraulik für Bauingenieure, Grundlagen und Anwendungen, 2012.
9. Mitosek M. Mechanika Płynów w Inżynierii i Ochronie Środowiska, OWPW, Warszawa, 2020.

The role of hydrodynamic interactions in the failure of siphon pipelines in Warsaw in 2019

Key words: large diameter pressure pipeline, siphon pipeline, hydrodynamic interaction, fatigue damage, pipeline failure