

# Zbiorniki magazynowe

## Analiza bezpiecznej eksploatacji

Intensywny rozwój przemysłu rafineryjnego i petrochemicznego w Polsce przyczynił się do wzrostu znaczenia zbiorników przeznaczonych do magazynowania zarówno surowej ropy naftowej, jak też produktów ropopochodnych. Jednocześnie magazynowanie produktów, np. w postaci rezerw strategicznych, związane jest z bezpieczeństwem energetycznym państwa. Od lat prowadzone są intensywne prace mające na celu zwiększenie istniejącej zdolności magazynowej baz i parków zbiorników. Biorąc pod uwagę znaczącą ilość magazynowanych produktów, w tym ponad 3,5 mln m<sup>3</sup> ropy naftowej i ponad 2 mln m<sup>3</sup> paliw płynnych, integralność mechaniczna zbiorników odgrywa kluczową rolę podczas ich eksploatacji.

Mając na uwadze bezpieczeństwo energetyczne oraz wychodząc naprzeciw oczekiwaniom eksploatujących zbiorniki magazynowe, UDT prowadzi intensywne działania mające na celu zwiększenie integralności i niezawodności eksploatowanych zbiorników. Program ten nosi nazwę „Analiza Bezpečnej Eksploatacji zbiorników magazynowych” i jest prowadzony w ramach działań Centrum Kompetencyjnego ds. tworzyw sztucznych oraz zbiorników bezcisnieniowych i niskociśnieniowych przeznaczonych do magazynowania materiałów niebezpiecznych o właściwościach trujących i żrących oraz materiałów ciekłych zapalnych.

Analiza bezpiecznej eksploatacji zbiorników magazynowych (ABE) ma na celu optymalizację inspekcji poprzez wskazanie zakresów konkretnych badań technicznych, których terminy wynikają z przepisów prawa. Pozwala na określenie rodzajów, zakresu oraz terminów celowanych badań nieniszczących i niszczących przy jednoczesnym utrzymaniu bezpieczeństwa na dotychczasowym lub wyższym poziomie.

Prawidłowa eksploatacja bezcisnieniowych i niskociśnieniowych zbiorników magazynowych wpisuje się w strategię Urzędu Dozoru Technicznego jako strażnika bezpieczeństwa publicznego. Nadrzędnym celem jest zapewnienie bezpieczeństwa dla osób, mienia i środowiska przy jednoczesnym zachowaniu jak największej dostępności urządzenia do pracy, tj. zapewnieniu wysokiej zdolności magazynowej zbiorników.

Okresowe badania wykonywane przez inspektorów Urzędu Dozoru Technicznego mają na celu określenie stanu technicznego zbiornika. Aktualnie obowiązujące terminy okresowych badań technicznych, zgodnie z tabelą stanowiącą załącznik do rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 18 września 2001 r. w sprawie warunków technicznych dozoru technicznego, jakim powinny odpowiadać zbiorniki bezcisnieniowe i niskociśnieniowe przeznaczone do magazynowania materiałów ciekłych zapalnych, przedstawiono w tabeli 1.



**JAKUB KOKOSIŃSKI**

Wydział Urządzeń Ciśnieniowych  
Departament Techniki UDT



**SEBASTIAN KOZIKOWSKI**

Dział Urządzeń Ciśnieniowych  
UDT Oddział w Gdańsku

Rodzaj badania	Częstotliwość badania zbiornika nie rzadziej niż			
	Zbiorniki stalowe naziemne		Zbiorniki stalowe podziemne	
	do 30 lat eksploatacji	powyżej 30 lat eksploatacji	do 20 lat eksploatacji	powyżej 20 lat eksploatacji
rewizja wewnętrzna	10 lat	6 lat	10 lat	5 lat
próba szczelności	10 lat	6 lat	10 lat	5 lat
rewizja zewnętrzna	2 lata	1 rok	2 lata	1 rok

Tabela 1. Częstotliwość badań okresowych przeprowadzanych przez UDT w zależności od czasu eksploatacji zbiornika (w tabeli pominięto zbiorniki z tworzyw sztucznych)

Właściwie dobrany zakres badań technicznych, wynikających z przepisów prawa, ma na celu zapewnienie równowagi pomiędzy bezpieczeństwem a kosztami eksploatacji. Z jednej strony istnieje zagrożenie dla życia lub zdrowia ludzkiego oraz mienia i środowiska wskutek ewentualnego wycieku ze zbiornika i znaczące koszty związane z usuwaniem skutków takiego zdarzenia. Z drugiej jednak strony istotną rolę odgrywają koszty związane z przygotowaniem (opróżnieniem i wyczyszczeniem) zbiornika do inspekcji przy jednocześnie chwilowej częściowej utracie zdolności magazynowej. Z uwagi na skalę zagrożenia nieodzownym priorytetem pozostaje bezpieczeństwo związane z eksploatacją zbiorników magazynowych.

Na bezpieczeństwo decydujący wpływ ma określenie aktualnego stanu technicznego zbiornika. Istotnym elementem jest również przewidywanie tego stanu na dalszy okres jego eksploatacji. Do przeprowadzenia takich analiz UDT stosuje rozpoznawalne i uznawalne na całym świecie standardy i normy, publikowane przez m.in.: American Petroleum Institute – API, jak również Engineering Equipment Materials Users Association – EEMUA.

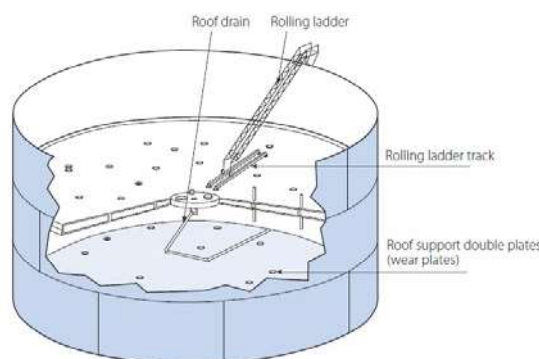
Podstawowym (choć nie jedynym) zagrożeniem dla zbiorników magazynowych – podobnie jak dla urządzeń ciśnieniowych eksploatowanych w instalacjach przemysłowych – są mechanizmy związane z korozją materiału. Lokalizacja i ocena wielkości korozji jest zatem kluczowym celem inspekcji. Doświadczenia UDT, operatorów baz i parków zbiorników z Europy i Stanów Zjednoczonych, jak również dane literaturowe wskazują jednoznacznie, że najbardziej narażone elementy zbiornika to jego dno, pierwsza carga oraz dach.

### Charakterystyka przedmiotowych zbiorników

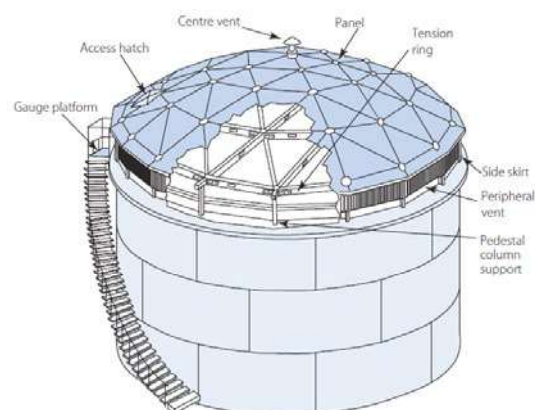
Analiza bezpiecznej eksploatacji (ABE) dotyczy przede wszystkim zbiorników bezciśnieniowych, przeznaczonych do magazynowania surowej ropy naftowej oraz produktów ropopochodnych. Dominującą grupę urządzeń stanowią konstrukcje będące w eksploatacji powyżej 30 lat. Są to

zbiorniki o osi pionowej, wykonane ze stali węglowej, z pojedynczą ścianką i pojedynczym dnem, wyposażone w dach pływający. Analiza ABE ma także zastosowanie dla zbiorników naziemnych i podziemnych z dachem stałym. Ponadto w szczególnych przypadkach, po uzgodnieniu z UDT, możliwe jest wyrażenie zgody na zastosowanie takich analiz dla innych rodzajów zbiorników magazynowych, np. będących w eksploatacji poniżej 30 lat.

Przykładowe schematy zbiorników magazynowych eksploatowanych na bazach paliw przedstawiają rysunki 1 i 2.



Rysunek 1. Schematyczny widok zbiornika magazynowego z dachem pływającym [źródło EEMUA 159, 5th edition]



Rysunek 2. Schematyczny widok zbiornika magazynowego z dachem stałym [źródło EEMUA 159, 5th edition]

## Wpływ czynników korozyjnych na integralność mechaniczną zbiorników

Medium robocze, jak na przykład surowa ropa naftowa, może zawierać związki korozyjne, zarówno organiczne, jak i nieorganiczne. Do najczęściej spotykanych należą m.in.: siarka, siarkowodór, chlor, chlorowodór, dwutlenek węgla, woda oraz mikroorganizmy (bakterie, grzyby). W warunkach pracy (magazynowania), przy określonej temperaturze, ciśnieniu i pH, tworzą mechanizm degradacji powodujący pogorszenie własności materiałów konstrukcyjnych zbiornika.

Mechanizmy degradacji charakterystyczne dla zbiorników magazynowych zostały szczegółowo opisane w literaturze, m.in. w dokumencie API RP 571 – Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry oraz w API RP 575 Inspection Practices for Atmospheric and Low-Pressure Storage Tanks. Przykładowe mechanizmy degradacji zidentyfikowane w zbiornikach magazynowych to:

- a) erozja,
- b) kruche pęknięcie,
- c) niskocykliczna korozja naprężeniowa,
- d) pęknięcie spowodowane obecnością H<sub>2</sub>S w środowisku mokrym,
- e) korozja atmosferyczna,
- f) korozja mikrobiologiczna,
- g) korozja od gleby,
- h) korozja spowodowana przez kwas solny,
- i) korozja spowodowana przez wodę kwaśną.

Szczególną rolę w analizie ABE odgrywa ocena wiarygodnych mechanizmów degradacji. W procesie identyfikacji ich aktywności należy wziąć pod uwagę fakt, że podczas pracy zbiornika jednocześnie mogą być aktywne dwa lub więcej mechanizmów degradacji. Ponadto tempo degradacji zbiornika na skutek oddziaływania czynników korozyjnych jest zmienne w czasie – może przyspieszać, zwalniać lub całkowicie się zatrzymać. W pewnych przypadkach uszkodzenia spowodowane przez jeden mechanizm mogą postępować do momentu, w którym inny czynnik zaczyna dominować i determinuje tempo uszkodzania zbiornika. Ocena oddziaływania mechanizmów degradacji powinna obejmować efekt kumulacji uszkodzeń od każdego wiarygodnego i mogącego wystąpić mechanizmu degradacji.

Ustalenie listy aktywnych mechanizmów degradacji i znajomość morfologii ich powstawania umożliwiają oszacowanie lub obliczenie prędkości korozji oraz określenie podatności na występowanie pęknięć. Wybór metod, np. probabilistycznej czy deterministycznej, zależy w głównej mierze od rodzaju i jakości posiadanych danych historycznych z poprzednio wykonanych inspekcji, napraw czy modernizacji zbiornika.

Do najczęstszych przyczyn utraty integralności, czyli wycieku medium roboczego na zewnątrz zbiornika, należą m.in.:

- a) intensywne korozja lokalna spowodowana wodą kwaśną w miejscu nieciągłości warstwy zabezpieczającej (np. laminatu na dnie zbiornika),
- b) korozja wżerowa na dnie zbiornika spowodowana oddziaływaniem CO<sub>2</sub> lub wody kwaśnej,
- c) pęknięcia dna w strefie krytycznej lub pasie obrzeżnym – w okolicy połączenia dna zbiornika i pierwszej cergi,
- d) nierównomierne osiadanie fundamentu,
- e) pęknięcia/nieszczelności opaski fundamentowej – w konsekwencji osiadanie zbiornika, wnikanie wody deszczowej pod dno zbiornika, korozja pierścienia obrzeżnego i w obrębie strefy krytycznej zbiornika,
- f) wżery lokalne na dnie zbiornika powstałe wskutek korozji mikrobiologicznej – powstawanie biofilmu,
- g) korozja pod izolacją.

## Ocena integralności mechanicznej zbiornika

Prawdopodobieństwo uszkodzenia i utraty integralności zbiornika zależy w dużej mierze od szybkości korozji. Szybkość ta jest determinowana przez rodzaj magazynowanego produktu, jak również przez kontakt z oparami powstającymi powyżej fazy ciekłej czynnika. Istotną rolę odgrywa tutaj rodzaj i jakość materiału konstrukcyjnego, w tym jego odporność na korozyjne oddziaływanie czynnika roboczego wraz ze znajdującymi się w nich zanieczyszczeniami (np. wody, chlorków, kwasów). Rodzaj przechowywanego w zbiorniku produktu odgrywa kluczową rolę i znacząco wpływa na jego żywotność. Znaczenie mają również zastosowane powłoki ochronne, wykonane najczęściej z tworzyw sztucznych. Przykładową korozyjność magazynowanych czynników przedstawia tabela 2.

Z uwagi na mocno ograniczony dostęp ocena stanu dna zbiornika to szczególne wyzwanie podczas prowadzonych analiz. Pogorszenie własności materiału może zachodzić jako jego ubytek, tj. pocienienie, zarówno od strony magazynowanego produktu, jak również od strony fundamentu czy gruntu, na którym posadowiony jest zbiornik. Dodatkowo zbiorniki są poddawane cyklicznym zmianom ciśnienia hydrostatycznego podczas ich napełniania i opróżniania, a także wpływowi rozszerzalności termicznej. Powyższe zmiany mogą wprowadzać dodatkowe naprężenia pomiędzy płaszczem a pierścieniem obrzeżnym dna zbiornika. W konsekwencji może to prowadzić do wystąpienia pęknięć w spoinach wskutek niskocyklicznego zmęczenia.

Trendy światowe w różnych gałęziach przemysłu otwierają nowe możliwości w dziedzinie prowadzenia inspekcji. Coraz częściej wykorzystuje się zaawansowane metody planowania

Magazynowany produkt	Zbiornik						
	Dno	Płaszcz		Dach			
	Blachy <sup>1</sup>	Obszar kontaktu z cieczą	Obszar kontaktu z oparami <sup>2</sup>	Dach stały		Dach pływający	
				Blachy	Elementy podpór	Blachy	Komory pływające
<b>Ropa</b>							
Wysoka ilość siarki	0,4-0,8	0,2-0,4	0,4-0,6	(0,4-0,6)	(0,4-0,6)	0,4-0,6	0,5-0,7
Niska ilość siarki	0,3-0,5	0,1-0,3	0,2-0,4	(0,2-0,4)	(0,2-0,4)	0,2-0,4	0,3-0,5
<b>Produkty pośrednie</b>							
Destylaty	0,15-0,35	0,15-0,35	0,65-0,85	0,65-0,85	0,65-0,85	(0,15-0,35)	(0,65-0,85)
<b>Paliwa do silników wysokoprężnych i odrzutowych</b>							
Olej napędowy	0,1-0,3	0,05-0,25	0,1-0,3	0,1-0,3	0,1-0,3	----	----
Kerozyna (Jet A1) <sup>3</sup>	0,1-0,3	0,05-0,25	0,1-0,3	0,1-0,3	0,1-0,3	----	----
<b>Paliwa do silników z zapłonem iskrowym</b>							
Benzyna	0,05-0,25	0,05-0,15	0,05-0,25	0,05-0,25	0,05-0,25	0,05-0,15	0,05-0,25
Nafta	0,15-0,35	0,05-0,25	0,15-0,35	0,15-0,35	0,15-0,35	0,05-0,25	0,15-0,35
<b>Słopy i media agresywne</b>							
Chemikalia							
Kwasy z pH < 5 <sup>4</sup>							
Płyny z 5 < pH < 8							
Aceton, akrylany	0,1-0,3	0,05-0,25	0,1-0,3	0,1-0,3	0,1-0,3	n/a	n/a
Etanol, metanol etc.	0,05-0,25	0,05-0,15	0,05-0,25	0,05-0,25	0,05-0,25	0,05-0,15	0,05-0,25
Styren, toluen etc.	0,1-0,3	0,05-0,25	0,1-0,3	0,1-0,3	0,1-0,3	n/a	n/a
Produkty zasadowe pH > 8	0,6-0,8	0,4-0,6	0,6-0,8	0,6-0,8	0,6-0,8	0,4-0,6	0,6-0,8

Podane wartości są wskazane jako zakresy; określenie konkretnych wartości liczbowych służących do określenia pozostałej żywotności zbiornika leży w gestii właściciela zbiornika / eksperta oceniającego integralność danego zbiornika.

Wartości w nawiasach dotyczą mediów, które zazwyczaj nie są magazynowane w tym typie zbiornika.

1 – Stal bez powłok ochronnych.

2 – Korozyja przy kontakcie z oparami magazynowanego medium może dochodzić do 1 mm/rok (w zależności od zawartości siarki oraz klimatu).

3 – Anglojęzyczna terminologia rozróżnia kerozynę od nafty.

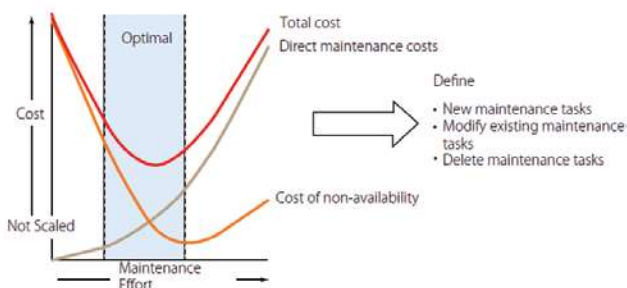
4 – Przeważnie przechowywane w zbiornikach ze stali nierdzewnej.

Tabela 2. Ogólna szybkość korozji w mm/rok [źródło EEMUA 159, 5th edition, table 4-1]

i wykonywania inspekcji. Przykładem mogą być analizy ryzyka (RBI), analizy niezawodności (RCM) i oceny integralności urządzeń. Narzędzia te, od lat stosowane w przemyśle rafineryjnym oraz energetycznym, z powodzeniem służą zarówno do określania stanu technicznego urządzeń ciśnieniowych, jak i planowania inspekcji. Metodologia RBI jest skutecznie wykorzystywana przez Urząd Dozoru Technicznego do zarządzania inspekcjami m.in. w przemyśle rafineryjnym.

Jednocześnie innowacyjne metody inspekcji zostały wdrożone przez użytkowników zbiorników magazynowych w różnych częściach świata i stanowią strategiczne narzędzie do

oceny integralności mechanicznej zbiorników. Optymalizacja inspekcji może istotnie wpłynąć na bezpieczeństwo eksploatowanych zbiorników, ich niezawodność oraz dostępność, co korzystnie wpływa na zdolność magazynową. Dodatkowo predykcja stanu technicznego zbiornika na dalszy okres eksploatacji pozwala na efektywne zarządzanie pracami remontowymi. Wiedza ta umożliwia m.in. zakup niezbędnych materiałów eksploatacyjnych, organizację czasu potrzebnego na przeprowadzenie prac remontowych oraz zapewnienie odpowiedniej kadry do ich wykonania. Korzystny wpływ optymalizacji inspekcji na koszty związane z zarządzaniem utrzymaniem ruchu przedstawia rysunek 3.



Rysunek 3. Optymalizacja kosztów i nakładów na utrzymanie ruchu [źródło EEMUA 159, 5th edition, Figure 17-1]

## UDT i Analiza Bezpiecznej Eksploatacji

W 2019 r. pilotażowym programem ABE zostało objętych 7 zbiorników służących do magazynowania oleju napędowego. Do dziś przy wykorzystaniu metodologii ABE przeprowadzono pełną ocenę 4 zbiorników, co obejmowało m.in.: wykonanie analiz, opracowanie programu badań eksploatacyjnych, jak również przeprowadzenie kompleksowych badań NDT.

Ocena stanu technicznego i integralności mechanicznej została przeprowadzona podczas normalnej pracy zbiorników, bez konieczności ich opróżniania z magazynowanego produktu, a co za tym idzie – bez utraty zdolności magazynowej.

Ocena wizualna miejsc niedostępnych została uzupełniona celowanymi badaniami NDT, zgodnie z zaleceniami wynikającymi z przeprowadzonych analiz ABE. Wykorzystano nowoczesne i rozpoznawalne techniki inspekcyjne, uznawane na świecie za skuteczne narzędzia do oceny stanu technicznego oraz integralności mechanicznej zbiorników magazynowych.

W ramach badań NDT eksperci Centralnego Laboratorium Dozoru Technicznego przeprowadzili m.in.:

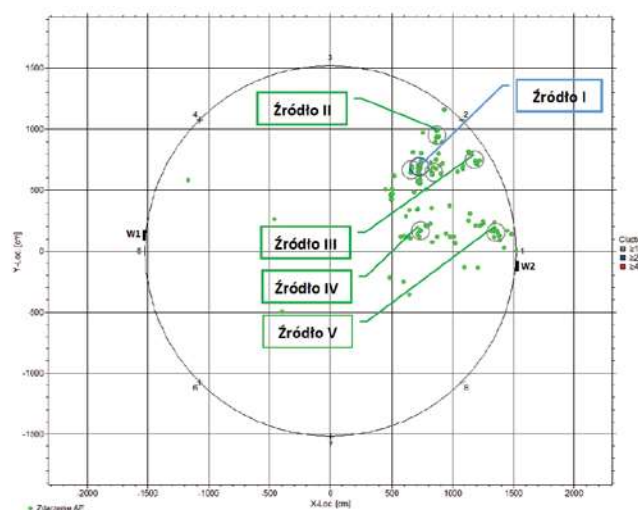
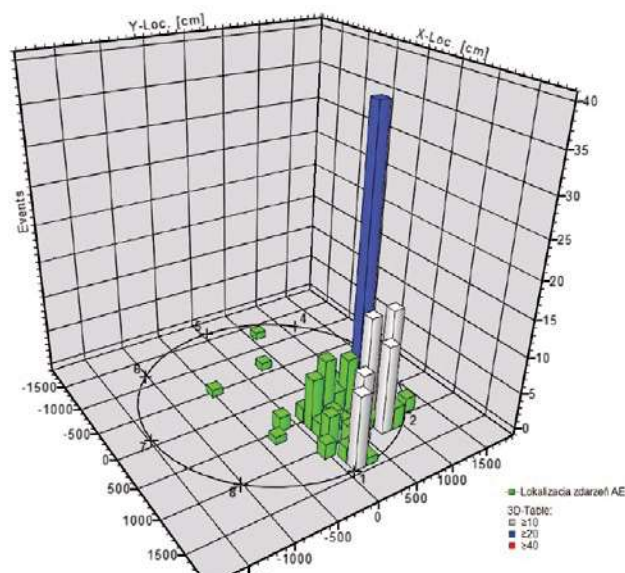
- 1) badanie dna oraz pierwszej cargo zbiornika metodą emisji akustycznej (AE) w celu oceny stanu technicznego dna zbiornika oraz połączenia dna zbiornika z pierwszą cargo od strony przestrzeni magazynowej. Przykładową wizualizację wyników przedstawiono na rysunku 4.
- 2) pomiar grubości płaszcza zbiornika metodą ultradźwiękową w celu weryfikacji grubości blach płaszcza w odniesieniu do dokumentacji koncesyjnej. Badanie wykonane jako UTT – liniowe, przy użyciu zautomatyzowanego systemu Scorpion 2 (rys. 5).

Brak konieczności opróżniania zbiorników magazynowych z medium roboczego możliwy był dlatego, że wyniki badań mieściły się w akceptowalnych kryteriach. Taka sytuacja nie musi zawsze występować. Wykonane badania mogą na przykład wykazać obecność procesów korozyjnych o wysokiej aktywności i/lub obecność wycieków. W takich przypadkach konieczne jest

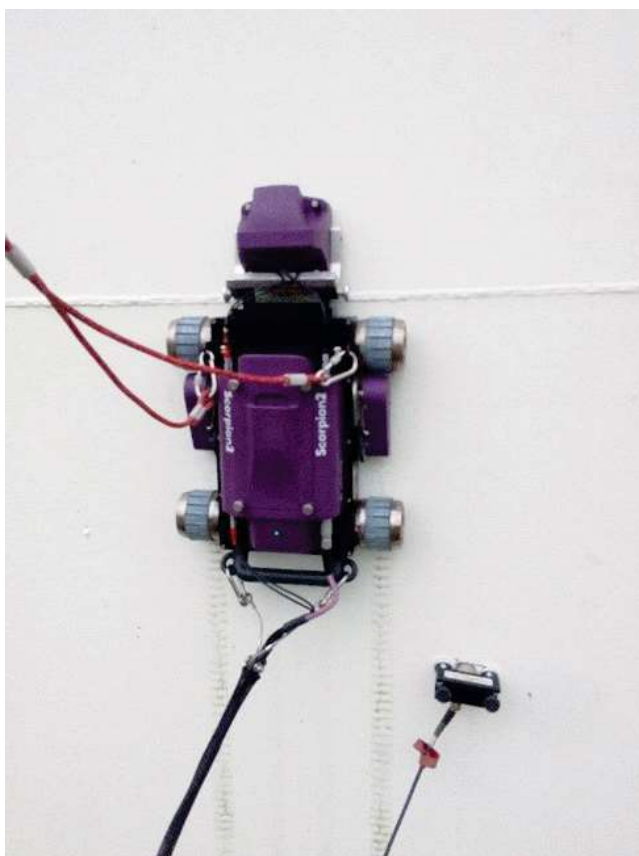
przeprowadzenie oględzin powierzchni wewnętrznych po opróżnieniu i neutralizacji zbiornika. Sposób dalszego postępowania z urządzeniem jest więc uzależniony od wyników wykonanych badań i sprawdzeń.

Elementem mającym znaczny wpływ na wykonywane Analizy Bezpiecznej Eksploatacji zbiorników magazynowych jest nieustanny rozwój innowacyjnych technik badawczych NDT. Inspektorzy UDT, znając morfologię aktywnych mechanizmów degradacji, mogą zalecać specjalne metody inspekcyjne do określenia integralności mechanicznej zbiornika, np.:

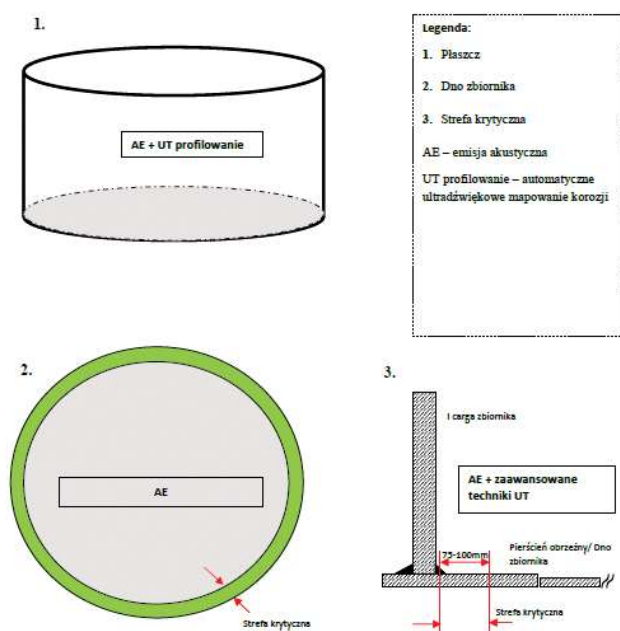
- a) emisję akustyczną,
- b) profilowanie grubości płaszcza (urządzenie ultradźwiękowe z napędem gąsienicowym),
- c) pulsacyjne prądy wirowe (Pulse Eddy Current),
- d) ultradźwiękowe fale prowadzone (Guided Wave),
- e) magnetyczny strumień rozproszony (MFL).



Rysunek 4. Badanie AE – wizualizacja wyników na płaszczyźnie



Rysunek 5. Profilowanie grubości płaszcza zbiornika – Scorpion 2



Rysunek 6. Przykładowe badania NDT stosowane w ramach ABE

Rysunek 6 przedstawia przykładowe techniki badawcze stosowane przez ekspertów CLDT do bezinwazyjnej oceny stanu technicznego i integralności mechanicznej zbiorników.

Analiza Bezpiecznej Eksploatacji zbiorników magazynowych ma na celu optymalizację inspekcji – określenie terminów, zakresów i rodzajów badań będących podstawą do oceny stanu technicznego zbiornika i jego przydatności do dalszej bezpiecznej eksploatacji. To innowacyjne narzędzie stosowane przez UDT, wykorzystujące równoległe wiedzę, wieloletnie doświadczenie w prowadzeniu inspekcji oraz dostępność nowoczesnych technik badawczych NDT. Pozwala na bezpieczną eksploatację zbiorników przy możliwie maksymalnym wykorzystaniu ich zdolności magazynowej.

## Literatura:

1. API STD 650 Welded Tanks for Oil Storage;
2. API STD 653 Tank Inspection, Repair, Alteration and Reconstruction;
3. API RP 575 Inspection Practices for Atmospheric and Low-Pressure Storage Tanks;
4. API RP 571 Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry;
5. API RP 580 Risk-based Inspection;
6. API RP 581 Risk-based Inspection Methodology;
7. EEMUA 159 Above ground flat bottomed storage tanks: A guide to inspection maintenance and repair;
8. WUDT-UC ABE:03.2020 Warunki Urzędu Dozoru Technicznego w zakresie planowania inspekcji zbiorników bezciśnieniowych i niskociśnieniowych, stalowych o osi pionowej przeznaczonych do magazynowania materiałów ciekłych zapalnych;