Nowe wyzwania dla infrastruktury krytycznej – od ekstremalnych zjawisk hydrologicznych i sejsmicznych po akty sabotażu



tekst: **EDYTA ZALEWSKA**, Uponor Infra Sp. z o.o.

Zmiany klimatu to temat, który zdominował debatę publiczną i naukową w ostatnich latach. Organizowane są liczne konferencje, sympozja i warsztaty poświęcone temu zagadnieniu, jednak wciąż brakuje odpowiedzi na kluczowe pytanie – czy posiadamy skuteczne narzędzia umożliwiające podejmowanie decyzji o budowie infrastruktury krytycznej z uwzględnieniem jej trwałości i odporności? Czy zanim przystąpimy do projektowania, przeprowadzamy rzetelną analizę wielokryterialną, obejmującą aspekty odporności materiałowej w całym okresie eksploatacji, z uwzględnieniem zmian klimatycznych? Czy przy analizie różnych rozwiązań dążymy do wyboru materiału najbardziej odpornego na akty sabotażu?

Ten artykuł ma na celu wskazanie nowych, istotnych kierunków myślenia o trwałości i bezpieczeństwie infrastruktury krytycznej. Przeanalizowano w nim doświadczenia międzynarodowe oraz narzędzia wspierające inwestorów w podejmowaniu racjonalnych decyzji, tak aby nowo budowana infrastruktura cechowała się jak największą trwałością i odpornością na zmieniające się warunki klimatyczne oraz geopolityczne.

Myślenie długoterminowe jako klucz do sukcesu

W czasach, gdy rośnie liczba zagrożeń naturalnych i geopolitycznych, niezawodność infrastruktury krytycznej powinna stanowić punkt wyjścia dla każdej inwestycji. Tymczasem zbyt często decyzje inwestycyjne są uzależnione od najniższej ceny, bez analizy konsekwencji w całym cyklu życia obiektu.

Nowelizacja ustawy Prawo zamówień publicznych przez zasadę efektywności (art. 17, ust. 1) [1] wprowadziła co prawda obowiązek dążenia przez zamawiających do uzyskania najlepszej jakości finalnego zamówienia przy jednoczesnym utrzymaniu konkurencyjnego kosztu jego pozyskania, ale nadal potrzebne jest wdrożenie nowych narzędzi pomagających w sposób transparentny przeprowadzać ocenę poszczególnych rozwiązań, aby osiągać najlepszy efekt z poniesionych nakładów, uwzględniając cały cykl życia inwestycji. W tym kontekście warto zwrócić uwagę na dokument opracowany przez Ministerstwo Klimatu i Środowiska *Poradnik weryfikacji inwestycji pod względem wpływu na klimat i adaptacji do zmian klimatu w okresie programowania UE 2021–2027* [2]. W przedmowie tej publikacji napisano m.in.: „Przepisy regulujące ich działalność wymagają zatem, aby poszczególne projekty otrzymujące wsparcie – z których wiele obejmuje duże inwestycje infrastrukturalne – zostały poddane weryfikacji pod względem wpływu na klimat i **adaptacji (odporności na zmiany klimatu) do zmian klimatu** [wyróżnienie autorki niniejszego artykułu] w celu ustalenia ich zgodności z celami w zakresie łagodzenia zmian klimatu (redukcji emisji) **oraz dostosowania do zmian klimatu, tj. do warunków zmienionego i zmieniającego się klimatu, które wpływają i będą w coraz większym stopniu wpływać na projekty w trakcie ich funkcjonowania (cyklu życia projektu)**".

„Zgodnie z wytycznymi KE weryfikacja klimatyczna powinna być przeprowadzana dla całego cyklu życia projektu, od etapu strategicznego planowania do etapu likwidacji i opiera się na dwóch filarach: weryfikacji neutralności klimatycznej potwierdzającej zgodność projektu z celem neutralności klimatycznej do 2050 r. oraz weryfikacji odporności klimatycznej potwierdzającej odporność infrastruktury na możliwe do przewidzenia zagrożenia klimatyczne w całym okresie eksploatacji infrastruktury, od początkowych etapów do fazy likwidacji" (ryc. 1).

Autorzy podkreślają, że już na etapie preselekcji projektów należy dokonywać identyfikacji ryzyka klimatycznego, obejmującej analizę wrażliwości, narażenia i podatności na zagrożenia.

Analiza kosztów pełnego cyklu życia inwestycji LLCA – standard światowy

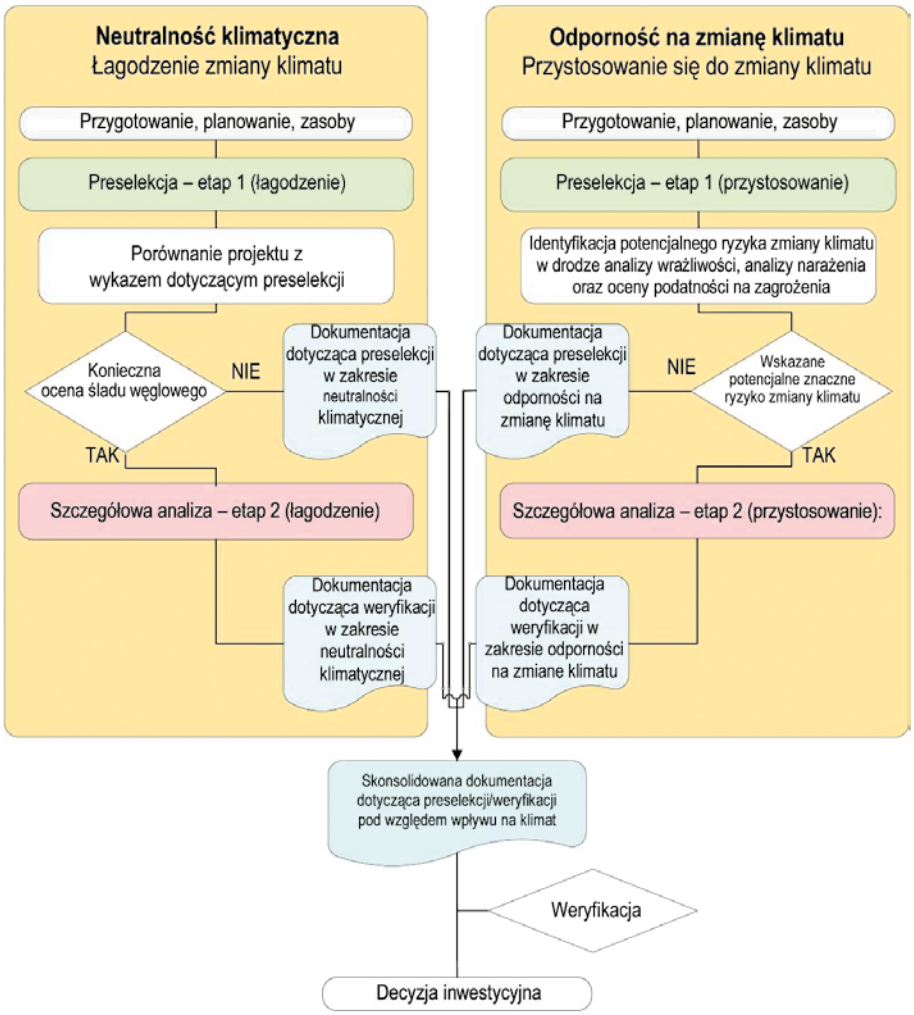
W Polsce nadal zbyt rzadko stosuje się podejście oparte na analizie pełnego cyklu życia inwestycji (LLCA – *Long Live Cost Analyse*). Inaczej sytuacja wygląda w innych krajach, m.in. w USA i Wielkiej Brytanii, gdzie od lat wykorzystuje się narzędzia pozwalające oceniać inwestycje nie tylko pod względem kosztów budowy, lecz także eksploatacji i utylizacji.

Przykładowo „Kongres USA poprawką do ustawy z 1948 r. o przetargach na inwestycje publiczne wprowadził zasady wyboru projektanta oparte na wyborze zespołu projektującego

według kryterium jakości QBS – *Quality, Based Selection* (wybór według jakości). Zasady te udoskonalono i przyjęto metodę uwzględniającą ocenę zarówno jakości, jak i koszty projektu budowlanego: QBC – *Quality and Cost – Based Selection* QCBS (wybór wg jakości i kosztów). Została ona wprowadzona m.in. przez Bank Światowy" [3].

„W celu poprawy czasu i bezpieczeństwa użytkowania inwestycji publicznych, określenia przedmiotu zamówienia na roboty budowlane oraz oceny projektów według ich jakości i najniższych kosztów w całym cyklu życia obiektu budowlanego (*Long Live Cost* – LLC) rząd USA ustanowił szczegółowe regulacje przygotowania i oceny inwestycji publicznych". (...) Dla ujednolicenia zasad przygotowania przetargu publicznego dla robót budowlanych według kryterium LLCA (*Long Live Cost Analyse*) Departament Handlu w 2007 r. zatwierdził *Podręcznik dla obliczania efektywności inwestycji dla ochrony kapitału*" [3].

Inwestorzy są zatem zobowiązani do oceny efektywności inwestycji z uwzględnieniem trwałości i jakości infrastruktury na każdym etapie jej cyklu życia – od rozpoczęcia budowy aż po moment likwidacji.



Ryc. 1. Weryfikacja klimatyczna i jej dwa filary: weryfikacja neutralności klimatycznej i weryfikacja odporności klimatycznej [2]

Analogiczne rozwiązania wprowadziła też Wielka Brytania, gdzie „w celu poprawy jakości projektowania i obniżenia kosztów operacyjnych eksploatacji obiektu postanowiono skorzystać z rozwiązań stosowanych przez sektor prywatny podczas realizacji swoich obiektów według zasad PFI (*Private Finance Initiative* – prywatna inicjatywa finansowa); powyższe zasady eliminują niską jakość, ponieważ partnerzy prywatni unikają ponoszenia wysokich kosztów związanych z bieżącą eksploatacją. Zastosowanie metody PFI oznacza wprowadzenie do sektora publicznego dyscypliny w zarządzaniu projektem inwestycji budowlanej od programu do eksploatacji" [3].

Brytyjski sektor wodny posiada szczegółowe opracowania obejmujące modele kosztów w całym cyklu życia magistral wodociągowych. Warto zwrócić uwagę na referat zatytułowany *Development of a whole life costing model for large diameter water mains* [4], który zaprezentowano również w Polsce podczas konferencji Polskiego Stowarzyszenia Producentów Rur i Kształtek z Tworzyw Sztucznych. Jego polskie tłumaczenie, dostępne na stronach PRiK [5], nosi tytuł *Opracowanie modelu kosztów pełnego cyklu życia magistral wodociągowych*. Wśród wniosków tego opracowania czytamy m.in.: „we wstępnej analizie kosztów projektu wszystkich czynników, najbardziej ekonomiczne rozwiązanie może się zmienić i w wielu przypadkach najlepszym rozwiązaniem staje się PE. Jednak docelowo to nie koszt będzie nadrzędnym czynnikiem, ponieważ, gdy woda staje się towarem deficytowym, rolę tę przejmuje trwałość i niezawodność systemu. W tych warunkach odporność na korozję i szczelność połączeń rur PE uczyni je jedynym wyborem niezależnie od średnicy".

Wiarygodność deklaracji producentów – jak ocenić rzeczywistą trwałość

W obecnych warunkach inwestycyjnych niezwykle ważne staje się wdrożenie – na wzór rozwiązań stosowanych w innych krajach – ogólnokrajowych, przejrzystych procedur oceny ekonomicznej zgodnych z kryterium LLCA, czyli analizą kosztów w pełnym cyklu życia inwestycji. Choć proces ten jest złożony i wymagający, jego znaczenie rośnie wraz z nasilającymi się zmianami klimatu, które zwiększają potrzebę zapewnienia trwałości i bezpieczeństwa infrastruktury krytycznej.

Zanim jednak takie narzędzia staną się standardem, warto już dziś podejmować działania przygotowawcze, zlecając, jeszcze przed rozpoczęciem projektowania, analizę wielokryterialną różnych wariantów technicznych. Powinna ona obejmować pełen cykl życia inwestycji oraz uwzględniać różne scenariusze eksploatacyjne, w tym okresy przeciążenia spowodowane np. podtopieniami. Kluczowe jest przy tym krytyczne podejście do deklaracji producentów, które często nie znajdują potwierdzenia w rzeczywistych danych czy doświadczeniach eksploatacyjnych.

Dlatego decyzje inwestycyjne należy opierać na wiarygodnych źródłach, w szczególności na zapisach norm branżowych. Przykładem może być norma PN-C-89224 [6] dotycząca przewodów



Ryc. 2. Kolektor dosyłowy PE do oczyszczalni ścieków w Nowym Sączu podczas powodzi w 2010 r. (DN 1400, 3,4 km, rok budowy 1995), fot. K. Kudlik [7]

rurowych z tworzyw termoplastycznych, w tym polietylenu, która potwierdza nie tylko ponad 100-letnią trwałość materiału, ale również wzrost jego sztywności w czasie. Takie dane stanowią rzeczywisty fundament do podejmowania świadomych decyzji inwestycyjnych – w przeciwieństwie do marketingowych obietnic. Tylko w ten sposób można skutecznie planować i zarządzać infrastrukturą w długiej perspektywie.

Technologia PE Uponor sprawdzona w warunkach ekstremalnych – przykład z Nowego Sącza

Przy wyborze technologii kluczowe znaczenie mają sprawdzone referencje – najlepiej potwierdzone przez innych inwestorów, którzy mogą wykazać się wieloletnią, bezawaryjną eksploatacją instalacji, także w trudnych warunkach pracy. Dobrym przykładem potwierdzającym niezawodność systemów PE Uponor, również w warunkach powodzi, jest wystąpienie przedstawicieli Sądeckich Wodociągów podczas konferencji IGWP towarzyszącej targom WOD-KAN w 2022 r. [7].

W 2010 r. przez Nowy Sącz przeszły dwie potężne fale powodziowe, które spowodowały znaczne zniszczenia infrastruktury. Woda zniszczyła m.in. most stalowy oraz wypłukała denne zabezpieczenie głównego kolektora DN 1400 PE transportującego ścieki do oczyszczalni, co doprowadziło do jego wyniesienia ponad lustro wody (ryc. 2). Jak relacjonowali pracownicy Wodociągów, spodziewano się wówczas przerwania ciągłości pracy kolektora i wycieku ścieków do środowiska. Ku zaskoczeniu wszystkich kolektor wykonany z rur PE Weholite i łączony metodą spawania ekstruzyjnego zachował pełną szczelność. Po ustąpieniu wód został ponownie osadzony w gruncie (ryc. 3) i funkcjonuje bezawaryjnie do dziś – obecnie trwa jego 30. rok eksploatacji.

Odporność na trzęsienia ziemi i inne obciążenia dynamiczne

W Polsce coraz częściej obserwujemy występowanie ekstremalnych zjawisk pogodowych, takich jak powodzie błyskawiczne. W tej sytuacji niezwykle ważne staje się projektowanie infrastruktury w sposób zapewniający jej odporność na obciążenia dynamiczne. Jednym z najbardziej wymagających przykładów takich obciążeń są trzęsienia ziemi.

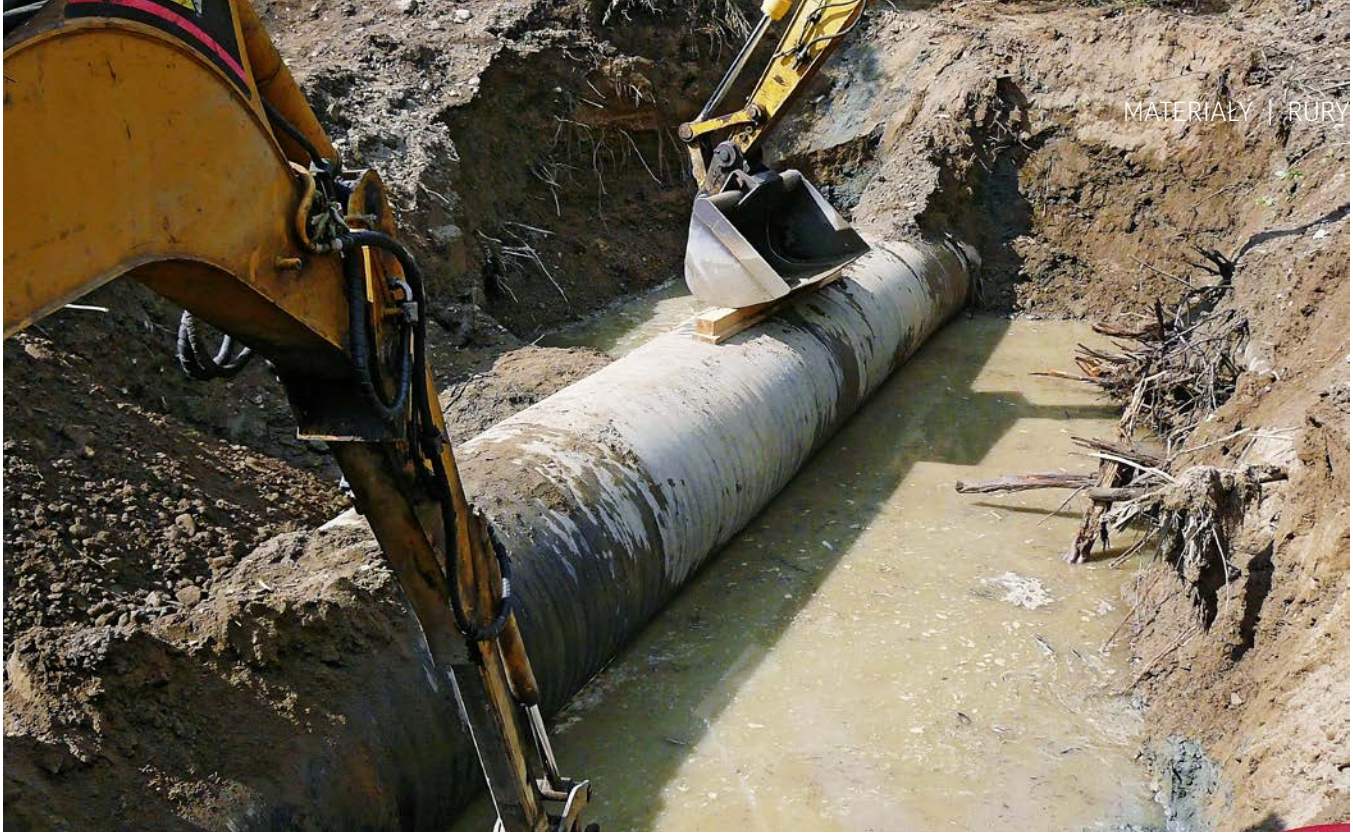
Odporność rurociągów z polietylenu (PE) na obciążenia i ruchy gruntu została potwierdzona już w 1995 r. podczas katastrofalnego trzęsienia ziemi w japońskim Kobe. Kataklizm ten pochłonął życie 6 tys. osób, zniszczył 440 tys. domów i spowodował ogromne straty infrastrukturalne. Po zdarzeniu firma Osaka Gas przeprowadziła szczegółową analizę stanu swojej sieci gazowej [8]. Wykazano liczne uszkodzenia rurociągów stalowych i żeliwnych, natomiast nie odnotowano żadnych awarii w części sieci wykonanej z PE.

Wyniki tej analizy przyczyniły się do gwałtownego wzrostu popularności rur PE w Japonii oraz w innych regionach sejsmicznie aktywnych. Co więcej, podczas kolejnych ośmiu trzęsień ziemi nie odnotowano żadnych awarii sieci wykonanych z tego materiału, co potwierdzono m.in. podczas konferencji branżowej w Las Vegas [9].

Odporność kinetyczna – bezpieczeństwo w warunkach konfliktu

W kontekście sytuacji za naszą wschodnią granicą coraz większe znaczenie zyskuje odporność kinetyczna infrastruktury, czyli jej zdolność do przetrwania oddziaływań o charakterze wybuchowym. Przykład z Doniecka, gdzie w 2014 r. kanały burzowe wykonane z rur PE Uponor przetrwały bombardowanie lotniska i posłużyły jako schronienie dla żołnierzy ukraińskich [10], potwierdza wyjątkową wytrzymałość tych konstrukcji (ryc. 4).

Doświadczenia te stały się impulsem do opracowania schronów na bazie rur polietylenowych [11]. W ramach badań przeprowadzono testy z użyciem ładunków wybuchowych o masie 10 kg TNT, detonowanych zarówno na powierzchni, jak i w gruncie w bezpośrednim sąsiedztwie konstrukcji (ryc. 5). Schron z rury PE Weholite, zainstalowany ponad metr pod ziemią, został poddany analizie odporności na złożone oddziaływanie fal uderzeniowych w gruncie (ang. *shockwave loading*), dynamiczne parcie gruntu oraz odpowiedź wewnątrz, np. przyspieszenia, deformacje konstrukcji oraz poziom hermetyzacji w czasie rzeczywistym.



Ryc. 3. Ponowne posadowienie kolektora PE DN 1400 w Nowym Sączu po ustąpieniu powodzi, fot. K. Kudlik [7]

Badania przeprowadzone zgodnie z normą NO-02-A116:2012 (kategoria C5) i standardami NATO (STANAG 2280, 4549, 2288, 2895, AEP-55) wykazały, że konstrukcje z rur PE Weholite Uponor zachowują pełną integralność nawet w ekstremalnych warunkach. Nie odnotowano trwałych odkształceń (powyżej 0,005 m, przy bazie 3,0 m) po serii detonacji, a konstrukcje wykazały odporność na wybuchy ładunków odpalanych w odległości 2 m od obiektu. Wyniki potwierdzają, że rozwiązania te mogą być z powodzeniem stosowane nie tylko w infrastrukturze krytycznej, lecz także w systemach obrony cywilnej i wojskowej.

Trwałość, kontrola i gwarancja kluczem do budowania odporności infrastruktury

W obliczu gwałtownych zmian klimatycznych i rosnącego ryzyka konfliktów odpowiedzialne planowanie i dobór technologii to nie tylko kwestia efektywności, lecz przede wszystkim bezpieczeństwa – zarówno ludzi, jak i zasobów. Warto zatem opracować przejrzyste narzędzia oparte na analizie kosztów pełnego cyklu życia (LLCA), uwzględniające pracę systemów również w warunkach przeciążenia wynikającego np. ze zmian klimatycznych. Zanim takie narzędzia staną się standardem, pomocna może być analiza wielokryterialna przeprowadzana już na etapie preselekcji rozwiązań, obejmująca trwałość materiałów w różnych warunkach pracy. Dobrą praktyką byłoby także wprowadzenie wydłużonego, np. 10-letniego, okresu gwarancji na materiały i wykonawstwo. Nie można przy tym zapominać o parametryzacji i skutecznej kontroli jakości materiałów, która w Polsce wciąż wymaga poprawy. Wszystkie te działania mogą znacząco zwiększyć niezawodność inwestycji, szczególnie w kontekście nowych wyzwań, przed którymi staje nasza infrastruktura krytyczna.



Ryc. 4. Zniszczony port lotniczy, Donieck, 21 stycznia 2015 r., fot. Igor Ivanov/ AP Images/East News



Ryc. 5. Detonacja ładunku w odległości 2 m od schronu DN 3000 z rury Weholite, fot. Pelter

Literatura

[1] *Ustawa z dnia 11 września 2019 r. Prawo zamówień publicznych* (online). Dz.U. 2019, poz. 2019. Dostępny w Internecie: https://sip.lex.pl/akty-prawne/dzu-dziennik-ustaw/prawo-zamowien-publicznych-18903829 (dostęp 23 stycznia 2026).

[2] *Poradnik weryfikacji inwestycji pod względem wpływu na klimat i adaptacji do zmian klimatu w okresie programowania UE 2021–2027* (online). Ministerstwo Klimatu i Środowiska, 2023. Dostępny w Internecie: www.gov.pl/web/klimat/poradnik-weryfikacji-inwestycji-pod-wzgledem-wplywu-na-klimat-i-adaptacji-do-zmian-klimatu-w-okresie-programowania-ue-2021-2028 (dostęp 23 stycznia 2026).

[3] Kubiszewski J.: *Efektywność inwestycji a postępowanie przetargowe* (online). „Inżynier Budownictwa", 24 marca 2010. Dostępny w Internecie: https://inzynierbudownictwa.pl/efektywnosc-inwestycji-a-postepowanie-przetargowe/ (dostęp 21 stycznia 2026).

[4] Shepherd M., Headford A., Jordan R., Reeves S., Walton D.: *Development of a whole life costing model for large diameter water mains*. Proceedings of the Plastics Pipes XIII Conference, Washington DC, 2–5th October 2006. Dostępny w Internecie: https://conduitcalc.plasticpipe.org/pdf/whole-life-system--cost-2-12-16.pdf (dostęp 21 stycznia 2026).

[5] Shepherd M., Headford A., Jordan R., Reeves S., Walton D.: *Opracowanie modelu kosztów pełnego cyklu życia magistral wodociągowych*. Materiały konferencyjne. I Konferencja Techniczna Sieci Wodociągowe z Tworzyw Sztucznych. Nowe Rozwiązania z Polipropylenu i Polietylenu, 6–7 grudnia 2007, Bielsko-Biała. Dostępny w Internecie: www.prik.pl/images/pdf/konferencje/konf1/M.-Shepherd-A.-Headford-R.-Jordan--S.-Reeves-D.-WaltonOpracowanie-modelu-kosztów-pełnego-cyklu-życia-magistral-wodociągowych.pdf (dostęp 21 stycznia 2026).

[6] PN-C-89224:2018-03 *Systemy przewodów rurowych z termoplastycznych tworzyw sztucznych. Zewnętrzne systemy bezciśnieniowe i ciśnieniowe do przesyłania wody, odwadniania i kanalizacji z nieplastyfikowanego polichlorku winylu (PVC-U), polipropylenu (PP) i polietylenu (PE). Warunki techniczne wykonania i odbioru*.

[7] Kudlik K.: *Infrastruktura wodociągowo-kanalizacyjna a skutki zmian klimatycznych*. Nagranie z konferencji #must have branży wod.-kan.: Wodociągowcy Wodociągowcom: Technologie dla małych, średnich i dużych przedsiębiorstw wod.--kan., 11 maja 2022. Dostępny w Internecie: www.youtube.com/watch?v=yeEM31cRt0s&t=109s (dostęp 22 stycznia 2026).

[8] Rubeiz C.G.: *Performance of Pipes During Earthquakes*. Proceedings of the Plastic Pipes XV Conference, Vancouver, 2010. Dostępny w Internecie: www.pe100plus.com/PPCA/2010-Vancouver-Conference-15.html (dostęp 22 stycznia 2026).

[9] Omuro H., Himono T.: *Polyethylene pipeline performance against earthquake*. Proceedings of the 19th Plastic Pipes Conference, September 24–26, 2018, Las Vegas, Nevada. Dostępny w Internecie: www.plasticpipe.org/common/Uploaded%20files/1-PPI/Divisions/Municipal%20and%20Industrial/Division%20Publications/Potable%20Water/Earthquake/HidekiOmuroTomokazuHimono2018PolyethylenePipelinePerformanceAgainstEarthquakePPXIXLA.pdf (dostęp 22 stycznia 2026).

[10] Донецкий аэропорт защищают киборги! [Donieckie lotnisko bronią cyborgi!], (Архив) Политика / Мнения [(Archiwum) Polityka / Opinie], 26 września 2014. Dostępny w Internecie: www.obozrevatel.com/blogs/60943-donetskij-aeroport-zaschischayut-kiborgi.htm (dostęp 22 stycznia 2026).

[11] *Schrony przyszłości Pelter* (online). Dostępny w Internecie: https://pelter.pl/ (dostęp 22 stycznia 2026).

www.uponor.com

Czytaj więcej