

dr inż. Tomasz Łakomy¹⁾
ORCID: 0009-0005-4693-5738

Analysis of acoustic non-destructive methods for detecting defects in concrete wind turbine foundations

Analiza akustycznych metod nieniszczących do wykrywania wad w betonie fundamentów turbin wiatrowych

DOI: 10.15199/33.2026.09.08

Abstract: This article presents the practical application of two NDT methods for detecting internal defects in concrete: the Impulse-Response (IR) method for quickly locating defects and the Impact-Echo (IE) method for precisely identifying them. The research demonstrated the complementarity of both methods: the ability to examine large surfaces of a structure (IR) while maintaining high accuracy in identifying detected defects (IE) and significantly reducing the number of destructive tests.

Keywords: detection of defects in concrete; NDT tests

Streszczenie: W artykule przedstawiono praktyczne zastosowanie dwóch metod NDT do wykrywania wad wewnętrznych betonu – metody Impulse-Response (IR) do szybkiego lokalizowania miejsc z wadami oraz metody Impact-Echo (IE) do ich precyzyjnej identyfikacji. Przeprowadzone badania wykazały komplementarność obu zastosowanych metod – możliwość przebadania dużych powierzchni konstrukcji (IR), przy zachowaniu wysokiej dokładności w określeniu wykrytych wad (IE) oraz znacznego ograniczenia ilości badań niszczących.

Słowa kluczowe: wykrywanie wad w betonie; badania NDT

Wind energy is one of the fastest-growing sectors of renewable energy sources. Modern wind turbines can reach heights of over 200 meters and weigh hundreds of tons, requiring exceptionally durable and stable foundations. The foundation forms the base for the entire structure and is responsible for safely transferring enormous loads to the ground. Its quality determines the durability, safety, and operational efficiency of a wind turbine.

A wind turbine foundation performs several crucial functions: it supports the weight of the entire structure, transfers wind-induced loads, dampens vibrations, protects the turbine from tipping over, and ensures stability for decades of operation. Unlike conventional buildings, turbine foundations are constantly exposed to dynamic loads resulting from variable wind forces and the movement of the rotor blades.

To ensure the transfer of these loads, turbine foundations must be properly designed in terms of size, weight, and ground support, ensuring internal integrity and ground integrity. Damage such as foundation cracking or delamination (loss of internal integrity), depending on their extent and severity, can lead to reduced durability and, in more severe cases, to the failure of the entire wind turbine.

Wind turbine foundations are constructed of reinforced concrete, monolithic construction, and are either directly founded or supported on piles. In the case of direct foundations, the foundation is typically cylindrical with a sloped top. The diameter of such foundations typically ranges from 15 to 25 meters, and their total height reaches approximately 1.5 to 3 meters.

Energetyka wiatrowa należy do najszybciej rozwijających się gałęzi odnawialnych źródeł energii. W związku z tym, że nowoczesne turbiny wiatrowe często mają wysokość ponad 200 m oraz masę kilkuset ton, wymagają wyjątkowo trwałych oraz stabilnych fundamentów. Od ich jakości zależy trwałość, bezpieczeństwo oraz efektywność pracy elektrowni wiatrowej. Fundamenty turbin wiatrowych przenoszą ciężar konstrukcji, obciążenia wywołane przez wiatr, tłumią drgania i wibracje, zabezpieczają turbinę przed przewróceniem i zapewniają stabilność przez kilkadziesiąt lat eksploatacji. W przeciwieństwie do zwykłych budynków, fundamenty turbin narażone są na obciążenia dynamiczne wynikające ze zmiennej siły wiatru oraz ruchu łopat wirnika.

W celu zapewnienia przenoszenia obciążeń fundamenty turbin wiatrowych powinny mieć odpowiednio zaprojektowane wymiary, masę oraz sposób oparcia na gruncie, tzn. zapewnioną integralność wewnętrzną oraz integralność z podłożem. Ich uszkodzenia typu pęknięcie lub rozwarstwienie (utrata integralności wewnętrznej) w zależności od zasięgu i intensywności, mogą prowadzić do spadku nośności i trwałości, a w konsekwencji do awarii elektrowni wiatrowej. Fundamenty turbin wiatrowych wykonywane są jako żelbetowe, monolityczne, posadowione bezpośrednio lub na palach. W przypadku posadowienia bezpośredniego fundament ma zwykle kształt walca z górną powierzchnią spadkową. Średnica fundamentów wynosi zazwyczaj 15–25 metrów, a wysokość 1,5–3 metrów.

Wymagania dotyczące betonowania fundamentów turbin wiatrowych

Ze względu na duże wymiary fundamentów turbin wiatrowych (konstrukcje masywne) oraz wysoki stopień zazbrojenia (utrudniony dostęp dla ludzi i sprzętu) – betonowanie jest

¹⁾ Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego; t.lakomy@pwr.edu.pl

Requirements and errors related to concreting wind turbine foundations

Due to the large size of wind turbine foundations (massive structures) and the high degree of reinforcement (difficult access for personnel and equipment), concreting is one of the most challenging stages of constructing this type of structure. To ensure complete and continuous filling of the foundation with concrete, the technologist develops a dedicated concrete mix that takes into account the foundation dimensions, temperature conditions during concreting, and the contractor's personnel and equipment capabilities, including the type and amount of retarder. The contractor is responsible for ensuring an adequate number of trained workers and appropriate equipment, including backup equipment, and for preparing scenarios for unplanned situations, such as interruptions in concrete supply. To monitor concrete in massive structures, where managing hydration heat and avoiding thermal cracking is crucial, it is recommended to use sensors that measure the temperature and curing rate of the concrete, as well as to provide a cooling system during the concrete setting phase.

Concreting of turbine foundations is typically carried out continuously to ensure their internal integrity. The process involves transporting the concrete using pumps, evenly distributing the mix, compacting it using vibrators, and monitoring the level and surface quality. In the case of large foundations, concreting can last up to several hours without interruption. After concreting, the foundation surface requires proper maintenance.

The most common errors associated with concreting turbine foundations include: so-called "cold joints" caused by improperly executed breaks in pouring, aggregate segregation/improper compaction of the concrete mix, errors related to excessively high or low setting temperatures of the concrete, lack of proper troweling and subsequent proper maintenance of the concrete surface (Figures 1 and 2).

Flaw detection test methods for wind turbine foundations

In newly constructed turbine foundations, the detection of voids after concreting, delamination/discontinuities, zones of insufficient compaction, thermal cracks and micro-cracks, and delamination around anchors is particularly important.

Non-destructive measurement methods are used to detect the above-mentioned defects, each with its own advantages and limitations [1÷4]: *ultrasonic*, *impulse-response (IR)*, *impact-echo (IE)*, *ground-penetrating radar (GPR)*, and *ultrasonic tomography (UT)*. For these reasons, before the final selection of a measurement method for a given facility is made, pilot tests are

jednym z najtrudniejszych etapów wznoszenia tego typu konstrukcji. W celu zapewnienia pełnego i ciągłego wypełnienia bryły fundamentu mieszanką betonową, opracowuje się dedykowaną mieszankę, uwzględniając rodzaj i ilość domieszki opóźniającej wiązanie, a także gabaryty elementu, warunki temperaturowe w trakcie betonowania oraz zaplecze osobowo-sprzętowe wykonawcy robót. Po stronie wykonawcy robót jest natomiast udostępnienie odpowiedniej liczby przeszkolonych pracowników, sprzętu, oraz przygotowanie scenariuszy na wypadek wystąpienia sytuacji nieplanowanych, takich jak np. przerwy w dostawie mieszanki betonowej. Do monitorowania betonu w konstrukcjach masywnych, gdzie kluczowe jest zarządzanie ciepłem hydratacji i unikanie rys termicznych, zaleca się stosowanie czujników, które określają temperaturę i stopień dojrzewania betonu oraz systemu chłodzenia na etapie wiązania betonu.

Betonowanie fundamentów turbin odbywa się zwykle w sposób ciągły, w celu zapewnienia integralności wewnętrznej. Proces obejmuje transport mieszanki betonowej pompami, równomierne jej rozprowadzanie, zagęszczanie przy użyciu wibratorów, kontrolę poziomu i jakości powierzchni. W przypadku dużych fundamentów betonowanie może trwać nawet kilkanaście godzin bez przerwy. Po zakończeniu betonowania powierzchnia fundamentu wymaga odpowiedniej pielęgnacji.

Najczęstsze błędy dotyczące z betonowania fundamentów turbin: tzw. „zimne łącza” powstające w przypadku niewłaściwie wykonanych przerw w betonowaniu; rozsegregowanie kruszywa/niewłaściwe zagęszczanie mieszanki betonowej; zbyt wysoka lub zbyt niska temperatura wiązania betonu; brak właściwego zatarcia oraz odpowiedniej pielęgnacji powierzchni betonowej (fotografie 1 i 2).

Metody badań defektoskopowych fundamentów turbin wiatrowych

W nowo budowanych fundamentach turbin wiatrowych szczególnie istotne jest wykrywanie: pustek po betonowaniu, delaminacji/nieciągłości, stref niedostatecznego zagęszczenia, rys i mikropęknięć termicznych oraz rozwarstwień wokół kotew. Do wykrywania takich wad stosuje się następujące **nieniszczące metody pomiarowe**, z których każda ma swoje indywidualne zalety i ograniczenia [1÷4]: metoda ultradźwiękowa, metoda Impulse-Response (IR), metoda Impact-Echo (IE), metoda georadarowa (GPR – Ground Penetrating Radar), tomografia ultradźwiękowa (UT). W celu potwierdzenia skuteczności metody pomiarowej na danym obiekcie wykonuje się zwykle badania pilotażowe lub stosuje jednocześnie dwie

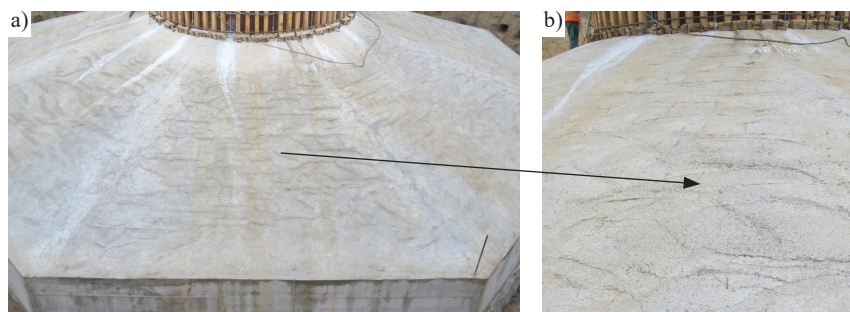


Photo 1. Improper troweling (a) and shrinkage cracks (b) on the upper/sloping surface of the foundation

Fot. 1. Niewłaściwe zatarcie (a) oraz rysy skurczowe (b) na górnej/spadkowej powierzchni fundamentu

typically performed to confirm its effectiveness, or two of the methods mentioned above are used simultaneously. However, it is recommended to verify the results of non-destructive testing using destructive methods, which include core-drillings and dig-outs, as well as the use of an inspection camera (borescope) inserted into the drilled hole. **Auxiliary tests**, with limited application to detecting internal defects in concrete, include *concrete rebound test*/Schmidt hammer (assessing the quality of concrete in the near-surface layer), scanning the reinforcement distribution using a reinforcement detector, *thermal imaging* (including the detection of moisture areas), and *3D laser scanning* (detection of structural irregularities or settlements).



Photo 2. Horizontal break in concreting („cold joint”) and an under-compacted layer of concrete („honeycombing”) – the side surface of the foundation

Fot. 2. Pozioma przerwa w betonowaniu („zimne łącze”) oraz niedogęszczona warstwa betonu („rakowiny”) – powierzchnia boczna fundamentu

z wymienionych metod. Wyniki badań nieniszczących zaleca się weryfikować metodami niszczącymi, do których należą odwierty kontrolne i odkrywki oraz zastosowanie kamery inspekcyjnej (boroskop) wprowadzanej w nawiercony otwór.

Do badań pomocniczych, o ograniczonym zastosowaniu do wykrywania wad wewnętrznych w betonie, można zaliczyć metodę sklerometryczną/młotek Schmidta (ocena jakości betonu w warstwie przypowierzchniowej), skanowanie rozkładu zbrojenia z wykorzystaniem detektora zbrojenia, badania termowizyjne (m.in. wykrywanie obszarów zawilgoceń), skanowanie laserowe 3D – wykrywanie nieregularności lub osiadania konstrukcji.

Description of the methods and equipment used in the tests

This article presents the use of two non-destructive acoustic methods for detecting internal defects in concrete:

- **Impulse-Response (IR) method** – rapid, coarse measurements at multiple measurement locations and the identification of “anomaly” locations for detailed examination, measuring depths up to approximately 50–100 cm,
- **Impact-Echo (IE) method** – detailed examination, measuring the depth of defects in concrete, measuring depths up to approximately 100–150 cm.

Verification of detected defects was performed based on inspection of cores cut-out from the structure.

The essence of the *Impulse-Response* method [5, 7, 8] (Figure 3a) is the measurement of parameters characterizing the elastic response of the tested concrete to the action of a short-duration mechanical impulse, which induces momentary vibrations within it. This pulse is induced by a point impact on the tested surface with a specially equipped measuring hammer. A broadband displacement sensor (geophone) is included in the measurement set, enabling the recording of the vibration amplitude of the induced concrete surface as a function of time. The basic evaluation parameter is „Dynamic Mobility”, or „Mobility” for short, which is defined as the ratio of the vibration velocity to the force that caused it. Parameters based on the Mobility graph are used in the analysis of results:

– **Average Mobility AM** (average

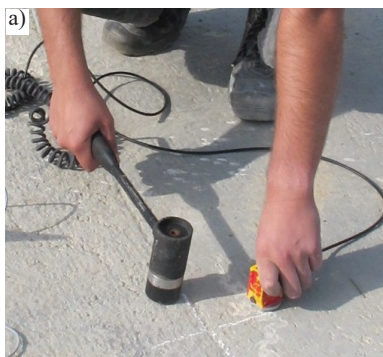


Photo 3. Measurements using: a) the Impulse-Response method; b) the Impact-Echo method

Fot. 3. Pomiary z wykorzystaniem: a) metody Impulse-Response; b) metody Impact-Echo



Opis metod i aparatury wykorzystanej w badaniach

W artykule przeanalizowano zastosowanie dwóch akustycznych metod nieniszczących do wykrywania wad wewnętrznych w betonie:

- **metody Impulse-Response (IR)** – szybkie, zgrubne pomiary w wielu miejscach pomiarowych oraz wskazanie miejsc występowania „anomalii” do badań szczegółowych; głębokość pomiaru 50÷100 cm,
- **metody Impact-Echo (IE)** – badania szczegółowe; pomiar głębokości wad w betonie; głębokość pomiaru 100÷150 cm;

Weryfikacji wykrytych wad dokonano na podstawie analizy odwiertów rdzeniowych wyciętych z konstrukcji. Istotą metody *Impulse-Response* [5, 7, 8] (fotografia 3a) jest pomiar parametrów charakteryzujących reakcję sprężystą badanego betonu na działanie krótkotrwałego mechanicznego impulsu, który wywołuje w nim chwilowe vibracje. Impuls ten jest wzbudzany za pomocą punktowego uderzenia w badaną powierzchnię specjalnie oprzyrządowanym młotkiem pomiarowym, natomiast znajdujący się w zestawie pomiarowym szerokopasmowy czujnik przemieszczeń (geofon), umożliwia rejestrację w funkcji czasu amplitudy drgań wzbudzonej powierzchni betonu. Jako podstawowy parametr

oceny przyjmuje się „Dynamic Mobility” lub w skrócie „Mobility”, tzn. zmienność dynamiki drgań, która jest definiowana jako stosunek prędkości drgań do wartości siły, która je wywołała. W analizach wyników wykorzystywane są parametry:

variation of vibration dynamics), a parameter helpful in detecting voids, delamination, separations (including surface repairs), and areas of improperly compacted concrete;

- **Mobility Slope MS** (rate of increase in vibration dynamics), which is closely related to the quality of the concrete structure's compaction and allows for the location of areas of insufficient concrete compaction or segregation of its structure ("honeycombing" defects);

- **Dynamic stiffness DS** (dynamic stiffness), a parameter related to the concrete quality, thickness, and support method of the element;

- **Void Index VI** (defect index), a parameter that allows for the location of internal defects such as "cavities" or "delamination" at the measurement location.

In the *Impact-Echo* method [5, 6, 8, 9] (Figure 3b), a short-duration impulse is introduced into the structure through a mechanical impact. Special equipment analyzes the propagation of the elastic wave within the structure, particularly the frequencies associated with its reflection. This allows for the estimation of the depth of internal defects and the thickness of structural elements. The main measurements are preceded by cleaning the surface, usually by grinding, and determining the shear wave propagation velocity in the structure's concrete. The accuracy of measurements in the *IE* method is influenced by factors such as the shape, size, and depth of the detected defect, the shape of the tested structure, and the degree of reinforcement.

Description of the test procedure on the facility

This article presents tests on one of the three inspected wind turbine foundations, where the most serious concrete damage was detected. The designed foundation concrete strength class was C30/37, and the reinforcing steel was AIIIIN.

After stripping the formwork, a horizontal break in the concreting ("cold joint") was observed on the side surface of the foundation (Figure 2), and above it "honeycombing" – a layer of concrete with varying degrees of honeycombing was observed. Due to the risk of loss of internal integrity of the newly constructed foundation, the supervisory authority commissioned flaw detection tests to determine the type and extent of defects in the upper concrete layer.

The following test program was adopted:

- Initial inspection of the upper concrete surface of the foundation – visual inspection, hammer tapping, and non-destructive measurement of the thickness of the reinforcing bar cover.
- Basic flaw detection tests – detection of „anomalies” in the concrete using the *Impulse-Response* method (30 measurement locations on the top and side surfaces of the foundation) and measurement of flaw depths using the *Impact-Echo* method at 6 selected measurement locations.
- Verification and calibration of flaw detection test results using control boreholes cut from the structure at depths of up to 30–70 cm.

Results and analysis of the inspection and flaw detection tests. The flaw detection tests provided key information

- **Average Mobility AM** (średnia zmienność dynamiki drgań) – pomocny w wykrywaniu pustek, delaminacji, odspojen (m.in. napraw powierzchniowych) oraz obszarów niewłaściwie zagęszczonego betonu;

- **Mobility Slope MS** (tempo przyrostu dynamiki drgań) – ściśle związany z jakością zagęszczenia struktury betonu; i pozwala zlokalizować obszary o niedostatecznym zagęszczeniu betonu lub rozsegregowaniu jego struktury (wady typu „honeycombing”);

- **Dynamic stiffness DS** (sztywność dynamiczna) – związany z jakością betonu oraz grubością i sposobem podparcia elementu;

- **Void Index VI** (współczynnik wadliwości) – pozwala na lokalizację obecności wad wewnętrznych typu „kawerna” lub „delaminacja” w miejscu pomiaru.

W metodzie *Impact-Echo* [5, 6, 8, 9] (fotografia 3b) przez mechaniczne uderzenie wprowadzany jest krótkotrwały impuls w konstrukcję, a dzięki specjalnemu oprzyrządowaniu analizowane rozchodzenie się fali sprężystej, szczególnie częstotliwości, którym towarzyszy odbicie tej fali, i na tej podstawie możliwe jest oszacowanie głębokości wad wewnętrznych oraz grubości elementów konstrukcyjnych. Zasadnicze pomiary poprzedza oczyszczenie powierzchni zwykle przez szlifowanie oraz ustalenie szybkości rozchodzenia się fali poprzecznej w betonie konstrukcji. Na dokładność pomiarów w metodzie *IE* ma wpływ m.in.: kształt, wielkość i głębokość wykrywanej wady; kształt badanej konstrukcji oraz stopień zbrojenia.

Opis badań i ich analiza

W artykule przedstawiono badania na jednym z trzech inspekcjonowanych fundamentów turbin wiatrowych, na którym stwierdzono duże uszkodzenia betonu. Projektowana klasa wytrzymałości betonu fundamentu to C30/37, natomiast stal zbrojeniowa – AIIIIN.

Po rozszalowaniu, na bocznej powierzchni fundamentu (fotografia 2) stwierdzono odcinkowo poziomą przerwę w betonowaniu („zimne łącze”), a powyżej niej „rakowiny” – warstwę betonu o różnym stopniu niedogęszczenia. W związku z zagrożeniem utraty wewnętrznej integralności nowo wykonanego fundamentu nadzór zlecił badania defektoskopowe, których celem było ustalenie rodzaju oraz zasięgu wad w górnej warstwie betonu.

Przyjęto następujący program badań:

- wstępna inspekcja górnej powierzchni betonu fundamentu – oględziny, ostukanie młotkiem, nieniszczący pomiar grubości otuliny prętów zbrojeniowych;
- badania defektoskopowe – wyszukanie „anomalii” w betonie metodą *Impulse-Response* (30 miejsc pomiarowych na górnej i bocznej powierzchni fundamentu) oraz pomiar głębokości wad metodą *Impact-Echo* w sześciu wybranych miejscach pomiarowych;
- weryfikacja oraz kalibracja wyników badań defektoskopowych na odwiertach kontrolnych wyciętych z konstrukcji na głębokości 30–70 cm.

Wnioski z przeprowadzonych badań defektoskopowych dotyczących rzeczywistego stanu technicznego nowo wykonanego fundamentu:

on the actual technical condition of the newly constructed foundation:

- The initial inspection revealed unevenness on the sloped surface of the foundation, improper troweling, and exposed coarse aggregate (honeycombing). On the side of the foundation, a horizontal discontinuity in the concrete casting was located 18–42 cm from its top edge, with areas of intense aggregate segregation above it. The concrete cover thickness met the design requirements.

- *Impulse-Response* method results:

- *Average Mobility* – values in the range of 1.3–3.5 (reference range < 10 units);

- *Mobility Slope* – values in the range of 3.0–8.6 (reference range < 4–6 units);

- *Void Index* – values in the range of 0.4 ÷ 1.7 (reference range < 2 ÷ 4 units).

Exceeding the reference level by the *Mobility Slope* parameter on the predominant slope and lateral surface (above the gap in concreting) of the foundation indicates the possibility of insufficient compaction in the near-surface or deeper sections of the concrete.

Detailed *Impact-Echo* measurements revealed the presence of significant internal defects in the concrete (delamination, honeycombing, and segregation of concrete) beneath the sloped surface of the foundation at depths ranging from approximately 12 cm to approximately 26 cm (Figure 4).

- Test core-drillings/boreholes (Figures 4 and 5) were drilled from locations indicated as defective by the *Impulse-Response* and *Impact-Echo* methods, and for verification purposes also from locations with weak or no defect indications.

Inspection of the core-drillings confirmed the presence of significant defects in the upper layer of the foundation concrete, i.e., discontinuities (loss of internal integrity) along the gap in the concreting and its contamination with sludge and loose concrete fragments. The core-drillings also determined that the weakly indicated defects were minor cracks and “honeycombing” without loss of concrete continuity.

The core-drillings with both minor and without defects were also used to verify the concrete grade assumed in the design.

After core-drillings tests, attention was drawn to the outflow of water used during the core-drilling through the discontinuity in the concreting on the lateral surface of the foundation, even

- wstępna inspekcja wykazała nierówności na powierzchni spadkowej fundamentu, miejsca niezatarcia betonu oraz odślnięcia kruszywa grubego („rakowiny”); na bocznej powierzchni fundamentu stwierdzono poziomą przerwę w betonowaniu znajdującą się w odległości 18 ÷ 42 cm od górnej krawędzi, a powyżej niej miejsca intensywnego rozsegregowania kruszywa; grubość otuliny spełniała wymagania projektowe;

- wskazania z metody *Impulse-Response*:

- *Average Mobility* – wartości z zakresu 1,3 ÷ 3,5 (zakres referencyjny < 10 jednostek);

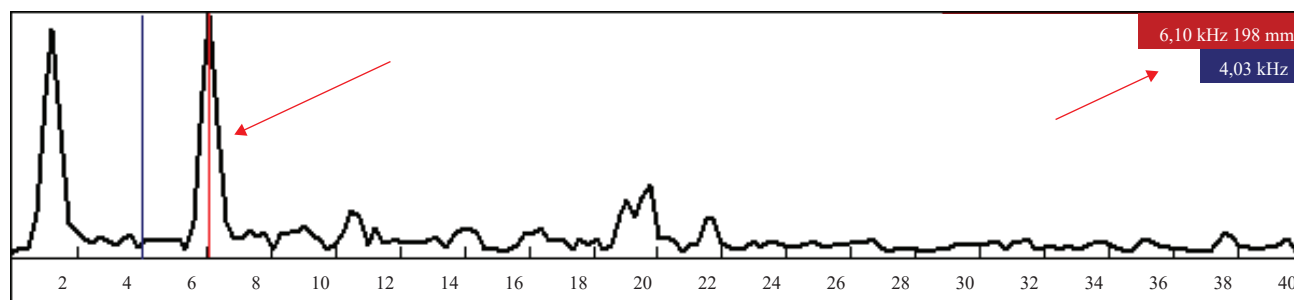
- *Mobility Slope* – wartości z zakresu 3,0 ÷ 8,6 (zakres referencyjny < 4÷6 jednostek);

- *Void Index* – wartości z zakresu 0,4 ÷ 1,7 (zakres referencyjny < 2÷4 jednostek);

Przekroczenie poziomu referencyjnego parametru *Mobility Slope* na przeważającej powierzchni spadkowej i bocznej (powyżej przerwy w betonowaniu) fundamentu, wskazuje na możliwość wystąpienia niedostatecznego zagęszczenia w przypowierzchniowych lub głębszych partiach betonu; uzupełniające pomiary metodą *Impact-Echo* wykazały obecność istotnych wad wewnętrznych w betonie (rozwarstwienia, niedogęszczenia i rozsegregowanie betonu) na głębokości 12÷26 cm pod powierzchnią spadkową fundamentu (rysunek);

- odwierty kontrolne (fotografie 4 i 5) wycięto z miejsc wskazanych przez metody *Impulse-Response* i *Impact-Echo* jako wadliwe oraz weryfikacyjnie z miejsc o słabym wskazaniu wad lub bez wskazań wad. Inspekcja odwiertów kontrolnych potwierdziła obecność istotnych wad w górnej warstwie betonu fundamentu, tj. nieciągłości (utrata wewnętrznej integralności) wzdłuż przerwy w betonowaniu oraz jej zanieczyszczenie szlamem i luźnymi okruchami betonu. W miejscach o słabym wskazaniu wad stwierdzono drobne rysy i „rakowiny” bez utraty ciągłości betonu. Odwierty kontrolne z drobnymi wadami i bez wad posłużyły do zweryfikowania zakładanej w projekcie klasy betonu. Po wykonaniu odwiertów kontrolnych zwrócono uwagę na wypływającą wodę używaną przy ich wierceniu, przez przerwę w betonowaniu na bocznej powierzchni fundamentu, nawet w znacznej odległości od miejsca lokalizacji odwiertów (fotografia 4);

- na podstawie przeprowadzonych badań defektoskopowych i odwiertów kontrolnych ustalono, że przerwa w betonowaniu ma charakter rozległy, narusza wewnętrzną in-



Measurement using the *Impact-Echo* method (frequency diagram) near a cut-out core with delamination and under-compaction of concrete at a depth of 18–22 cm – the dominant frequency of 6.10 kHz (peak) corresponds to a defect located in the concrete at a depth of approximately 20 cm

Pomiar metodą *Impact-Echo* (wykres częstotliwościowy) w rejonie odwiertu z rozwarstwieniem i niedogęszczeniem betonu na głębokości 18–22 cm – dominująca częstotliwość 6,10 kHz (peak) odpowiada wadzie znajdującej się w betonie na głębokości ok. 20 cm

at considerable distances from the borehole locations (Figure 4).

● Based on the flaw detection tests and control core-drillings, it was determined that the discontinuity/delamination in the concreting is extensive, compromises the internal integrity of the foundation (a safety hazard), is located relatively deep below the surface (depth 18–42 cm – significant depth of demolition required in high-quality, heavily reinforced concrete), and is contaminated with partially bound sludge and loose concrete fragments that cannot be removed by flushing, and injection will not restore the foundation's integrity. For these reasons, the foundation in question has been designated for complete demolition.

For comparison, in the second foundation inspected, where a localized gap in the concreting and aggregate segregation were also detected after stripping, tests showed that this type of damage only extends to a depth of approximately 5–10 cm and can be repaired relatively easily using surface repair techniques, i.e., by jackhammering of the delamination and reprofiling it using specialized PCC mortars [10].

Summary

This article presents the results of flaw detection in the concrete of wind turbine foundations. It also demonstrates the effectiveness and advantages of combining two flaw detection methods for diagnosing local internal flaws in large-scale structures. The *Impulse-Response* (IR) method allowed for the rapid coverage of a large structure surface with a measurement grid. Based on the generated dynamic response distribution maps, it was possible to roughly pinpoint potentially damaged areas, so-called “anomalies,” distinguishing between defects such as delamination/cracks, honeycombing/voids, and loss of support. In the next stage of the study, the “anomalous” areas were subjected to a more detailed inspection using the *Impact-Echo* (IE) method, which allowed for the identification of the type and estimation of the depth of previously detected flaws. Therefore, using only one

of the flaw detection methods mentioned above would have resulted in significant limitations in the area of investigation or the accuracy of identifying detected flaws. Control core-drillings enabled the calibration of the readings from the IR and IE methods and confirmed their high



Photo 4. Water flow along the delamination in concreting/„cold joint” at a considerable distance from the place where the control drilling was made on the upper surface of the foundation

Fot. 4. Wypływ wody wzdłuż przerwy w betonowaniu/„zimnego łącza” w znacznej odległości od miejsca wykonania odwiertu kontrolnego na górnej powierzchni fundamentu

tegralność fundamentu (zagrożenie bezpieczeństwa), znajduje się relatywnie głęboko pod powierzchnią (ok. 18÷42 cm – wymagany znaczny zakres rozkuć w betonie wysokiej klasy, silnie zbrojonym) i jest zanieczyszczona częściowo szlamem i luźnymi fragmentami betonu, których nie uda się usunąć przez płukanie, a iniekcja nie przywróci integralności fundamentu. W związku z tym przedmiotowy fundament został przeznaczony do likwidacji. Badania drugiego z analizowanych fundamentów, gdzie po rozszalowaniu również stwierdzono miejscowo przerwę w betonowaniu i rozsegregowanie kruszywa, wykazały, że uszkodzenia sięgają na głębokość 5–10 cm i można je usunąć w wyniku

naprawy powierzchniowej, tj. przez wykucie rozwarstwienia i jego reprofilację z użyciem specjalistycznych zapraw typu PCC [10].

Podsumowanie

Wykazano skuteczność oraz zalety łączenia dwóch metod defektoskopowych do diagnozowania miejscowych wad wewnętrznych w konstrukcjach wielkopowierzchniowych. Zastosowanie metody *Impulse-Response* (IR) pozwoliło w krótkim czasie pokryć siatką pomiarową dużą powierzchnię konstrukcji i na podstawie wygenerowanych map rozkładu odpowiedzi dynamicznej konstrukcji wskazać miejsca potencjalnie uszkodzone, tzw. „anomalie” z rozróżnieniem wad typu rozwarstwienia/pęknięcia, niedogęszczenia/pustki, utrata podparcia. Miejsca „anomalii” na kolejnym etapie badań poddano bardziej szczegółowej inspekcji z zastosowaniem metody *Impact-Echo* (IE), która pozwoliła na określenie rodzaju wad i oszacowanie ich głębokości. Zastosowanie tylko jednej z wymienionych metod defektoskopowych wiązałoby się więc z istotnymi ograniczeniami dotyczącymi obszaru badań lub dokładności w określeniu wykrytych wad. Odwierty kontrolne umożliwiły natomiast kalibrację wskazań z metod IR i IE oraz potwierdziły ich dużą

zgodność z wykrytymi uszkodzeniami, z podziałem na miejsca pomiarowe z istotnymi uszkodzeniami, drobnymi oraz bez uszkodzeń.

Zaletą zaproponowanej metodyki badań z wykorzystaniem dwóch komplementarnych metod nieniszczących oraz jest moż-

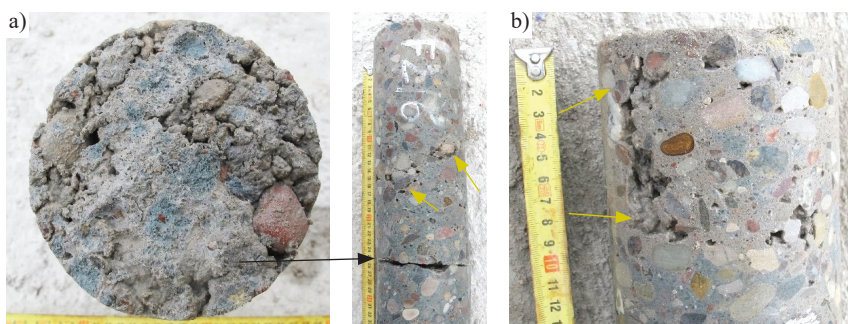


Photo 5. Control cut-outs from the upper/sloping surface of the foundation with defects such as: a) concrete delamination/„cold joint”; b) concrete under-compaction/„honeycombing” of various intensity, but without loss of concrete continuity

Fot. 5. Odwierty kontrolne wycięte z górnej/spadkowej powierzchni fundamentu z wadami typu: a) nieciągłość betonu/„zimne łącze”; b) niedogęszczenie betonu/„rakowiny” o różnej intensywności, ale bez utraty ciągłości betonu

consistency with the detected damages, with tested locations divided into significant damage, minor damage, and no damage.

The advantages of the proposed testing methodology, using two complementary non-destructive methods, include the ability to examine the structure with unilateral access, the ability to perform quick measurements on the entire structure or a significant portion of it, reducing the risk of “missing” areas with “hidden” defects, and limiting the number of control boreholes to the locations of detected defects.

The tests results from the *IR* and *IE* flaw detection methods allowed for the detection of critical damage to the newly constructed wind turbine foundation, which were subsequently confirmed by control boreholes, threatening its future safety. The tests also demonstrated the “irreparability” of the detected defects, and as a result, the foundation was not approved for operation.

Photo: author

*Received: 27.04.2026
Revised: 24.06.2026
Published: 23.09.2026*

liwość badania konstrukcji przy dostępie jednostronnym oraz wykonania szybkich pomiarów na całej lub znacznej części konstrukcji, co zmniejsza ryzyko „pominięcia” obszarów z „ukrytymi” wadami, a także na ograniczenie liczby odwiertów kontrolnych do miejsc wykrytych wad.

Przeprowadzone badania z wykorzystaniem metod defektoskopowych *IR* i *IE* pozwoliły wykryć krytyczne uszkodzenia nowo wykonanego fundamentu turbiny wiatrowej, zagrażające bezpieczeństwu jego późniejszego użytkowania, co potwierdzono odwiertami kontrolnymi. Stwierdzono „nienaprawialność” wykrytych wad i w efekcie fundament nie został dopuszczony do eksploatacji.

Fotografie: autor

*Artykuł wpłynął do redakcji: 27.04.2026 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 24.06.2026 r.
Opublikowano: 23.09.2026 r.*

Literature

- [1] Beutel R, Reinhardt H, Grosse C, Glaubitt A, Krause M, Maierhofer C, Algernon D, Wiggenhauser H, Schickert M. Comparative performance tests and validation of NDT methods for concrete testing, *Journal of Nondestructive Evaluation* 27 (1–3): 59–65, 2008.
- [2] American Concrete Institute Report ACI 228.2R-98, *Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1998, 62 pp.
- [3] Drobiec Ł, Jasiński R, Piekarczyk A. Diagnostyka konstrukcji żelbetowych. T. 1, Metodologia, badania polowe, badania laboratoryjne betonu i stali, Tom 1, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 2010.
- [4] Gorzelańczyk T, Hoła J, Sadowski Ł, Schabowicz K. Methodology of nondestructive identification of defective concrete zones in unilaterally accessible massive members, *Journal of Civil Engineering and Management*, 19:6, 775–786. 2013. <http://dx.doi.org/10.3846/13923730.2013.812577>.
- [5] Hoła J, Schabowicz K, Sadowski L. Non-Destructive Evaluation of the Concrete Floor Quality Using Impulse Response S'Mash And Impact-Echo

Methods, www.ndt.net, the e-Journal & Database of Nondestructive Testing – ISSN 1435-4934, 3, 2009.

- [6] Garbac A, Harassek P, Van der Wielen A, Piotrowski T, Nguyen L. Diagnostyka konstrukcji betonowych za pomocą impact-echo i radaru, *Wiśła, Dni Betonu*, 2010.
- [7] Davis AG, Hertlein BH, Lim MK, Michols K. Impact-echo and Impulse Response Stress Wave Methods: Advantages and Limitations for the Evaluation of Highway Pavement Concrete Overlays, *Nondestructive Evaluation of Bridges and Highways*, S.B. Chase, Ed., Proc SPIE 2946, 88–96, Scottsdale, AZ, December 1996.
- [8] ASTM C1740 – 10 Standard Practice for Evaluating the Condition of Concrete Plates Using the Impulse-Response Method.
- [9] ASTM C1383 – 04 Standard test method for measuring the p-wave speed and the thickness of concrete plates using the impact-echo method.
- [10] PN-EN 1504 (1–10) Seria norm definiujących wyroby przeznaczone do ochrony i napraw konstrukcji z betonu.