



JERZY HOŁA
Politechnika Wroclawska
e-mail: jerzy.hola@pwr.edu.pl

LEONARD RUNKIEWICZ
Instytut Techniki Budowlanej w Warszawie
e-mail: l.runkiewicz@itb.pl

Manuscript submitted 2018.08.02 - revised 2018.09.17
initially accepted for publication 2018.10.10, published in December 2018

METHODS AND DIAGNOSTIC TECHNIQUES USED TO ANALYSE THE TECHNICAL STATE OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

METODY I TECHNIKI DIAGNOSTYCZNE STOSOWANE W OCENIE STANU TECHNICZNEGO KONSTRUKCJI ŻELBETOWYCH

DOI: 10.30540/sae-2018-030

Abstract

The paper presents the problems concerning the principles of developing expertise and performing tests on reinforced concrete structures. The situations that justify the need to provide expertise, the subject of which are constructions made of reinforced concrete, are described. A layout of the content of expertise that is usually adopted in practice has been included and commented on. The basic principles that should be followed when diagnosing the structures in question are provided. The available diagnostic methods and techniques, including non-destructive and semi non-destructive ones, are reviewed. This review is enriched with classifications that facilitate the selection of specific methods for individual diagnostic needs. In addition, useful literature with regards to the discussed topic has been indicated.

Keywords: expertise, reinforced concrete structures, diagnostics, diagnostic methods.

Streszczenie

W artykule przedstawiono problematykę dotyczącą zasad wykonywania ekspertyz i badań konstrukcji żelbetowych. Przybliżono sytuacje uzasadniające potrzebę sporządzania ekspertyz, których przedmiotem są konstrukcje wykonane z betonu zbrojonego. Zamieszczono i skomentowano, przyjmowany zazwyczaj w praktyce układ treści ekspertyzy. Podano podstawowe zasady, których należy przestrzegać podczas diagnozowania przedmiotowych konstrukcji. Dokonano przeglądu dostępnych metod i technik diagnostycznych, w tym nieniszczących i seminieniszczących. Przegląd ten wzbogacono klasyfikacjami ułatwiającymi doboru odpowiednich metod do konkretnych potrzeb diagnostycznych. Ponadto wskazano przydatną w rozpatrywanym temacie literaturę.

Słowa kluczowe: ekspertyza, konstrukcje żelbetowe, diagnostyka, metody diagnostyczne.

1. INTRODUCTION

With regards to the title of the paper, the authors assume that it will be most useful to those who have not yet prepared expert opinions on reinforced concrete structures, or those who have relatively little experience of this subject. Bearing the above in mind, it seems reasonable to introduce some situations that justify the need to prepare expertise reports of such constructions.

Despite the common belief about the durability of reinforced concrete structures, they are subjected to progressive degradation during exploitation.

1. WPROWADZENIE

W nawiązaniu do tytułu referatu autorzy przyjęli założenie, że praca powinna być przydatna przede wszystkim tym, którzy jeszcze nie sporządzali ekspertyz konstrukcji żelbetowych lub posiadają w tym temacie stosunkowo niewielkie doświadczenie. Mając powyższe na uwadze, wydaje się być zasadnym przybliżenie sytuacji uzasadniających potrzeby sporządzania opracowań o charakterze ekspertyzowym, których przedmiotem są takie konstrukcje.

Pomimo powszechnego przeświadczenia o trwałości konstrukcji żelbetowych ulegają one podczas eksplo-

Degradation mechanisms that are specific to constructions made of concrete and reinforcing steel include those related to physical phenomena, mechanisms related to chemical phenomena and also biological strength mechanisms caused by the influence of the above mentioned factors. In practice, there is usually a combination of various mechanisms in the form of complex degradation processes that cause damage to the structure, which in turn determines their safety, reliability and durability.

The activity and practical significance of the above-mentioned degradation mechanisms varies depending on the material from which the construction is made, which is shown in Table 1 for reinforced concrete and steel structures.

atacji postępującej w czasie degradacji. Spośród mechanizmów degradacji specyficznych dla konstrukcji wykonanych z betonu i stali zbrojeniowej należy wymienić te związane ze zjawiskami fizycznymi, mechanizmy związane ze zjawiskami chemicznymi oraz mechanizmy wytrzymałościowe biologiczne powodowane oddziaływaniem ww. czynników. W praktyce zazwyczaj występuje kombinacja złożona z różnych mechanizmów w postaci złożonych procesów degradacyjnych powodujących uszkodzenia konstrukcji, decydujących w efekcie o jej bezpieczeństwie, niezawodności i trwałości.

Aktywność i praktyczne znaczenie wymienionych mechanizmów degradacji są zróżnicowane w zależności od materiału, z którego konstrukcja jest wykonana, co przykładowo dla konstrukcji żelbetowej i stalowej ilustruje tabela 1.

Table 1. Activity of degradation mechanisms depending on the material of the structure, which is based on [2]
Tabela 1. Aktywność mechanizmów degradacji w zależności od materiału konstrukcji, na podstawie [2]

Mechanisms of degradation	Construction type	
	Reinforced concrete	Steel
PHYSICAL		
Accumulation of inorganic contamination	●	●
Cyclical freezing / defrosting	●	○
Erosion	●	○
Crystallization	●	
The impact of extreme temperatures	○	●
Creeping	○	
Relaxation	●	○
Shrinkage	●	
Overloads	●	●
Washout	●	
Fatigue	○	●
Changes in geotechnical conditions	●	●
CHEMICAL		
Carbonation of concrete	●	
Corrosion	●	●
Impacts of aggressive substances	●	●
Reactions between material components	●	
BIOLOGICAL		
Accumulation of organic contamination	●	●
Impact of micro-organisms	●	●
Impact of plants	●	○
Designation: ● – basic mechanism; ○ – additional mechanism		

It is worth noting that the intensity of degradation processes may vary in various operational situations. It can be slowed down when a structure is properly protected against adverse environmental impacts,

Warto zauważyć, że w różnych sytuacjach eksploatacyjnych intensywność procesów degradacyjnych może być różna. Może ona być spowolniona gdy konstrukcja jest należycie zabezpieczona przed nie-

but it can also be accelerated, e.g. due to sudden mechanical factors (overloads, strikes, explosions), the occurrence of extraordinary weather events or other random events (extreme precipitation, fire), improper usage, the lack of care of a structure during its operation, and also construction or design errors, etc.

The consequence of degradation processes, when the initial durability of the structure becomes insufficient, is the appearance of defects that are more or less severe and which require repair or reinforcement [1, 3, 4]. However, it can also be the cause of more serious damage, including a construction catastrophe or failure.

Bearing in mind durability, including the safety and reliability of reinforced concrete structures, such structures are subjected to periodic technical inspections in accordance with the requirements of Construction Law [5].

The determination, as a result of the periodical assessment, of significant irregularities and major defects or damage to particular elements or to the entire structure usually results in the need to conduct a much more detailed and advanced procedure, which is referred to as emergency diagnostics [4]. Its results are important, but not the only component of expertise. The need to conduct this type of diagnostics may also be signalled, depending on the situation, by a user, technical supervisor or state construction supervisor.

Performing detailed diagnostics of reinforced concrete structures for the purpose of an expert report may also be required in order to assess the possibilities and conditions for implementing planned structural modernizations, superstructures, extensions, or technological changes in facilities that can result in changes in the nature or value of existing loads. In this case, such diagnostics are called target ones and can be of a two-stage character [4]. As with emergency diagnostics, they require a whole range of proceedings, among which are technical (diagnostic) tests and analysis that require the skilful use of modern research and analytical methods. The necessity of using such methods is needed in order to make a sufficiently accurate assessment of the technical characteristics of a structure, including the identification of defects. This in turn creates the basis for the correct interpretation and assessment of the occurring phenomena, as well as for the designation of practical remedial actions.

korzystnymi oddziaływaniami środowiskowymi, ale może też ulec przyspieszeniu, na przykład w wyniku nagłego zadziałania czynników mechanicznych (przeciążenie, uderzenie, wybuch), wystąpienia nadzwyczajnych czynników pogodowych czy też innych zdarzeń o charakterze losowym (ekstremalne opady, pożar), nieprawidłowej eksploatacji, braku dbałości o konstrukcję w czasie jej użytkowania, błędów wykonawczych lub projektowych itd.

Konsekwencją procesów degradacyjnych, w sytuacji gdy trwałość pierwotna konstrukcji staje się niewystarczająca, jest pojawienie się w niej mniej lub bardziej poważnych uszkodzeń wymagających naprawy lub wzmocnienia [1, 3, 4]. Ale może to być też przyczyną wystąpienia poważniejszych zniszczeń, w tym awarii lub katastrofy konstrukcji.

Mając na uwadze trwałość, w tym bezpieczeństwo i niezawodność konstrukcji żelbetowych, poddaje się je okresowym przeglądom technicznym, zgodnie z wymaganiami ustawy *Prawo budowlane* [5].

Stwierdzenie w wyniku dokonanej oceny okresowej istotnych nieprawidłowości, poważniejszych usterek lub uszkodzeń poszczególnych elementów lub całej konstrukcji skutkuje zwykle potrzebą przeprowadzenia znacznie bardziej szczegółowego i zaawansowanego w stosunku do okresowego przeglądu postępowania, nazywanego fachowo diagnostyką doraźną [4]. Jej rezultaty stanowią istotny, ale nie jedyny składnik opracowania zwanego ekspertyzą. Potrzebę przeprowadzenia tego rodzaju diagnostyki może też sygnalizować, w zależności od zaistniałej sytuacji, użytkownik, nadzór techniczny albo państwowy nadzór budowlany.

Przeprowadzanie szczegółowych diagnostyk konstrukcji żelbetowych na użytek opracowania ekspertyzowego może też wynikać z potrzeby oceny możliwości i warunków przeprowadzania planowanych modernizacji konstrukcyjno-budowlanych, nadbudów, rozbudów albo zmian technologicznych w obiektach skutkujących zmianami charakteru czy wartości dotychczasowych obciążeń. W tym wypadku diagnostyki takie nazywane są docelowymi, i mogą mieć charakter dwuetapowy [4]. Podobnie jak diagnostyki doraźne wymagają one przeprowadzania całego szeregu postępowania, wśród których integralne są badania techniczne (diagnostyczne) i analizy, wymagające z kolei umiejętne stosowania nowoczesnych metod badawczych i analitycznych. Konieczność stosowania takich metod jest niezbędna w celu dokonania dostatecznie dokładnej oceny właściwości technicznych konstrukcji, w tym m.in. identyfikacji wad, co stwarza podstawy zarówno do prawidłowej

The subject of expertise may not only include reinforced concrete structures in use, but also structures that are rebuilt, modernized, excluded from operation, are after failure, or those that have suffered from a catastrophe. It can also involve dismantled structures, and in this case it is not only existing conditions, but also demolition designs and erected constructions that are subjected to analyses. In such a situation, existing and design states should be analysed. In special cases, expert opinions may also apply to designed reinforced concrete structures. This is possible at the stage of design, in which such structures are documented using drawings, calculations and descriptions [6].

As was already mentioned, the results of diagnostic and analytical procedures (diagnosis) constitute a very important and fundamental part of expert reports. However, expertise would not be complete and useful for the purpose it is intended for if, due to the results of these proceedings, there were no formulations of genesis, rationally justified hypotheses, forecasts and formulated directives [6].

The intention of the authors of this work is to present the issues covered in the title, including the providing of the layout of the content of an expertise report usually adopted in practice along with its comments; drawing attention to the leading role of diagnostic procedures in expertise reports; providing their general principles; reviewing available diagnostic methods and techniques; proposing various classifications and signalling descriptions of selected methods in order to facilitate the selection of a specific method for an individual diagnostic need; providing methods of analysis; and an indication of a bibliography of this topic that can be useful primarily to those who have not yet developed expertise of reinforced concrete structures.

2. LAYOUT OF THE CONTENT OF EXPERTISE REPORTS

Figure 1 presents the usually adopted layout of the content of an expertise report, the object of which is a reinforced concrete structure. This clear layout can consist of a total of eight chapters (points), which are marked using Arabic numerals in brackets for the purpose of the article. When commenting on it, largely following work [6], the following problems should be briefly mentioned.

interpretacji i oceny występujących zjawisk, jak też formułowania praktycznych działań zaradczych.

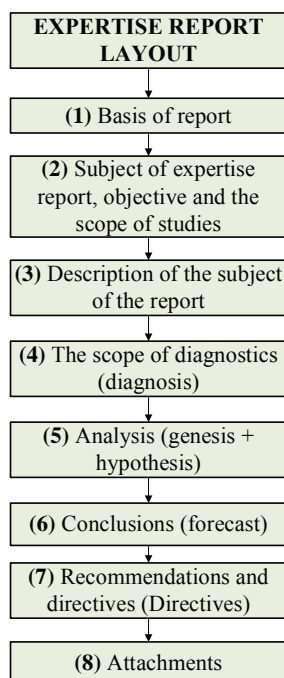
Przedmiotem opracowań ekspertyzowych mogą być nie tylko konstrukcje żelbetowe użytkowane, ale również rozbudowywane, modernizowane, wyłączone z użytkowania, po awarii lub te które uległy katastrofie. Mogą nimi być też konstrukcje rozbierane, i w tym przypadku analizom poddawane są nie tylko stany zastane, ale i projekty rozbiórek, konstrukcje wznoszone, i wtedy należy analizować zarówno stany istniejące jak i stany projektowe. W szczególnych przypadkach ekspertyzom mogą zostać poddane konstrukcje żelbetowe projektowane, i jest to możliwe w takim stadium projektowania, w którym zostały one udokumentowane rysunkami, obliczeniami i opisami [6].

Jak to już zasygnalizowano rezultaty postępowań diagnostycznych i analitycznych (diagnoza) stanowią bardzo ważną i podstawową część opracowań ekspertyzowych. Jednak ekspertyzy nie byłyby kompletne i przydatne do celu, któremu powinny służyć, gdyby w następstwie rezultatów tych postępowań zabrakło w nich sformułowań genezy, racjonalnie uzasadnionych hipotez, określenia prognoz i sformułowanych dyrektyw [6].

Zamierzeniem autorów niniejszej pracy jest przybliżenie problematyki ujętej w tytule, w tym m.in. podanie przyjmowanego zazwyczaj w praktyce układu treści ekspertyz wraz z ich skomentowaniem, zwrócenie uwagi na wiodącą rolę postępowania diagnostycznego w ekspertyzach i podanie ich ogólnych zasad, dokonanie przeglądu dostępnych metod i technik diagnostycznych, w tym zaproponowanie różnorodnych ich klasyfikacji i sygnałnych opisów wybranych metod w celu ułatwienia doboru konkretnej metody do konkretnej potrzeby diagnostycznej, sposobów analiz i ponadto wskazanie, z myślą przede wszystkim o tych, którzy jeszcze nie wykonywali do tej pory ekspertyz konstrukcji żelbetowych, przydatnej w tym temacie bibliografii.

2. UKŁAD TREŚCI EKSPERTYZ

Zazwyczaj przyjmuje się następujący, zilustrowany rysunkiem 1, układ treści ekspertyzy, której przedmiotem jest konstrukcja żelbetowa. Ten przejrzysty układ może tworzyć w sumie osiem rozdziałów (punktów), oznaczonych na użytek niniejszej pracy cyframi arabskimi w nawiasie. Komentując go, w dużej mierze za pracą [6], należy w skrócie wspomnieć o następujących problemach.



The basis of the report (1) should include the following: a formal basis consisting of the data regarding the order and the concluded contract; dates of local inspections and visual inspections; the materials used to develop the expertise, emphasizing data received from clients and that obtained from other sources; and also used literature, standards, regulations and recommendations.

The subject of the expertise report, objectives and the scope of studies (2) should be specified unambiguously and precisely, because shortcomings in this area can be used in the case of civil law disputes.

The description of the subject of the report (3) should be concise, and if necessary supplemented with figures, sketches or photographs. It should contain the necessary dimensions of the structure, the type of foundation, the soil and water conditions, and also the possible environmental impacts, e.g. corrosive, paraseismic or dynamic influences.

The scope of diagnostics (diagnostic tests) (4) should be selected with regards to the purpose and scope of expertise. In the case of reinforced concrete structures, they may be broad and include, among others: an analysis of technical documentation, an assessment of the physical conditions of entire structures or their fragments, various tests of structures or their fragments, geotechnical investigations of soil substrate, surveying and inventory tests of structures, specialist tests of concrete and reinforcing steel, environmental tests, and also the identification of defects and damage.

Fig. 1. The common layout of an expertise report of reinforced concrete structures in the form of a block diagram

Rys. 1. Zwyczajowy układ ekspertyzy konstrukcji żelbetowych w postaci schematu blokowego

W odniesieniu do podstawy opracowania (1) należy dokładnie podawać: formalną podstawę w rozumieniu danych o zleceniu i zawartej umowie, daty przeprowadzanych wizji lokalnych i badań wizualnych, materiały wykorzystane do opracowania ekspertyz, z wyszczególnieniem danych otrzymanych od zleceńodawców i uzyskanych z innego źródła, wykorzystaną literaturę, normy, przepisy i zalecenia.

Przedmioty ekspertyz, cele i zakresy opracowań (2) powinny być określone jednoznacznie i precyzyjnie, bo uchybienia w tym względzie mogą zostać wykorzystane w wypadku sporów natury cywilnoprawnej.

Opis przedmiotu opracowania (3) powinien być w zasadzie zwięzły, w miarę potrzeb uzupełniony o rysunki lub szkice i fotografie, zawierający niezbędne wymiary konstrukcji, podający sposób posadowienia i warunki gruntowo-wodne oraz ewentualne oddziaływania środowiska, np. korozyjnego, wpływów parasejsmicznych czy dynamicznych.

Zakresy diagnostyk (badań diagnostycznych) (4) należy dobierać do celu i zakresu ekspertyz. W przypadku konstrukcji żelbetowych mogą być one szerokie i obejmować m.in.: analizy dokumentacji technicznych, oceny stanów technicznych całych konstrukcji lub ich fragmentów, różnorodne badania konstrukcji lub ich fragmentów, badania geotechniczne podłoża gruntowego, badania geodezyjne i inwentaryzacyjne konstrukcji, badania specjalistyczne betonu i stali zbrojeniowej, badania środowiskowe, identyfikację wad i uszkodzeń. Ponadto mogą one

In addition, they may include laboratory tests and trial loads. Bearing in mind the numerous cases that show that a structure does not work as it was designed, but as it was made, it is justified to identify static schemes and loads of structures [6]. For the purpose of diagnostics, modern non-destructive and semi-destructive testing methods should be used, as well as destructive methods if possible. These non-collated sets of aforementioned diagnostic activities consist of a process of explaining the causes of occurred situations or phenomena, the result of which are diagnoses that are helpful when ordering the observed phenomena. Moreover, they facilitate the generalization of experience that was gained during the evaluation of cases [6].

Analyses of the occurring phenomena, e.g. in the form of any existing damage and defects, and the determination of the causes of their occurrence should be included in the next chapter (5). This chapter is based on the results of measurements and diagnostic tests of the evaluated structures, which are helpful in static, dynamic and other calculations, as well as in variant analyses and assessments of the safety and reliability of a structure, including stability and the maintenance of ultimate limit states and serviceability limit states. If the volume of the calculations, including numerical ones, is significant, moving them to attachment (8) should be considered. However, this chapter should still include results in the form of, e.g. tabular summaries.

As a result of the calculations and analyses, the difference between the existing and the desired state is determined, and the conditions of the occurrence of phenomena (genesis) and their significance are specified. On their basis, the hypotheses that explain the occurred phenomena are formulated. If there are several hypotheses, and they are verified in order to determine the most probable, then the results of these verifications that were performed either empirically or on the basis of additional tests should be included in this chapter.

Subsequent chapters (6) and (7) of expertise reports involve conclusions (forecasts) formulated on the basis of the results of diagnostic actions, calculations and analyses obtained in (4) and (5), as well as recommendations and directives. Further proceedings with structures, concerning, among others: the improvement of the existing physical condition, meeting the basic requirements resulting from Construction Law, the concept of repairs and reinforcements, guidelines regarding repair

obejmować badania laboratoryjne oraz obciążenia próbne. Mając na uwadze liczne przypadki pokazujące, że konstrukcja pracuje nie tak jak została zaprojektowana, ale tak jak została wykonana, zasadne są identyfikacje na obiektach schematów statycznych i obciążeń konstrukcji [6]. Na użytek diagnostyk należy wykorzystywać nowoczesne metody badawcze nieniszczące i seminieniszczące, a także, w miarę możliwości, metody niszczące. Te niebędące zbiorami zamkniętymi wymienione działania diagnostyczne są procesem wyjaśniania przyczyn zaistniałych sytuacji czy zjawisk, wynikiem których są diagnozy pomocne w porządkowaniu zaobserwowanych zjawisk i ułatwiające uogólnienie zdobytych podczas rozpatrywanych przypadków doświadczeń [6].

Analizy występujących zjawisk, na przykład w postaci zaistniałych uszkodzeń i wad, oraz określenie przyczyn ich powstania zawarte powinna być w kolejnym rozdziale (5). Ich podstawy stanowią rezultaty pomiarów i badań diagnostycznych przedmiotowych konstrukcji pomocne w przeprowadzanych obliczeniach statycznych, dynamicznych i innych, w wariantowych analizach i ocenach bezpieczeństwa oraz niezawodności konstrukcji, w tym stateczności, zachowania stanów granicznych nośności i stanów granicznych użyteczności. Jeżeli obszerność obliczeń, w tym numerycznych, jest znaczna należy rozważyć przeniesienie ich do załącznika (8), z pozostawieniem jednak w tym rozdziale rezultatów w postaci na przykład tabelarycznych zestawień. W wyniku obliczeń i analiz zostaje określona różnica między stanem istniejącym a pożądanym, warunki powstania i znaczenie zaistniałych zjawisk (geneza), na której to podstawie formułowane są następnie hipotezy wyjaśniające zaistniałe zjawiska. Jeżeli hipotez jest kilka i poddawane są one sprawdzeniu w celu ustalenia najbardziej prawdopodobnej, to rezultaty tych sprawdzeń, wykonywanych czy to na drodze empirycznej, czy na podstawie dodatkowo przeprowadzonych badań, powinno się umieścić w tym rozdziale.

Kolejnymi rozdziałami (6) i (7) tak ułożonych treści ekspertyz są w kolejności wnioski (prognozy) sformułowane na podstawie uzyskanych w (4) i (5) rezultatów działań diagnostycznych, obliczeń i analiz, a także zalecenia i polecenia (dyrektywy). W tych miejscach ekspertyz formułuje się zazwyczaj toki dalszego postępowania z konstrukcjami, dotyczący m.in.: poprawy istniejącego stanu technicznego, spełnienia wymagań podstawowych wynikających z Prawa budowlanego, koncepcji napraw i wzmocnień, wytycznych napraw i wzmocnień, rozbiórki, itp.

and reinforcements or demolition, etc., are usually formulated in these places of expertise reports.

In attachments (8), it is worth including, among others: photographic documentation; figures with an inventory of defects, damage and the marking of places of excavations; extensive calculations, etc. Placing these “materials” according to the presented scheme (fig. 1) has a positive impact on the legibility of expertise reports. Documents in the form of certificates that confirm the membership of experts to the Chamber of Civil Engineers, photocopies of their construction qualifications, or specialized qualifications should also be placed in (8).

3. DIAGNOSTIC PROCEDURES AND THEIR LEADING ROLE IN EXPERTISE REPORTS

3.1. General principles of proceedings

As previously stated in the introduction, the results of diagnostic procedures constitute the basis for duly prepared expertise reports that are useful for the purposes they are intended for. General rules, which should be taken into account in such proceedings, are given below and follow those of the authors of papers [4, 7].

Existing reinforced concrete structures should be assessed in accordance with current standards. Previous standards, which were in force at the time of designing these constructions, can only constitute the so-called information background. The levels of safety and reliability of a structure should not be lower than the levels required when designing new structures.

Depending on requirements, entire reinforced concrete structures, or only their selected elements, e.g. damaged or in need of structural changes, repairs or modernization, may be subjected to diagnostic procedures. In such cases, the diagnostic procedures should also cover the other elements of the structure for which there is a suspicion that the required levels of reliability and safety of use could be reduced.

In the examinations of reinforced concrete structures, or elements of these structures, the actual state and conditions of their work should be taken into account.

The choice of methods and diagnostic techniques should be adapted to the physical condition of the examined structures. Non-destructive and semi-destructive methods are especially recommended. In exceptional cases, trial loads can also be used. The used methods should ensure the obtaining of results

W załącznikach (8) warto umieścić m.in. dokumentacje fotograficzne, dokumentacje rysunkowe z inwentaryzacjami wad i uszkodzeń oraz zaznaczeniem miejsc wykonanych odkrywek, obszerne obliczenia itp. Umieszczenie „materiałów”, zgodnie z przedstawionym schematem (rys. 1), wpływa korzystnie na czytelność opracowań ekspertyzowych. W załączniku (8) powinny również zostać umieszczone dokumenty w postaci zaświadczeń o członkostwie autorów ekspertyz w Izbie Inżynierów Budownictwa, kserokopie posiadanych przez nich uprawnień budowlanych, uprawnień specjalistycznych itp.

3. POSTĘPOWANIA DIAGNOSTYCZNE I ICH WIODĄCA ROLA W EKSPERTYZACH

3.1. Ogólne zasady postępowania

Jak stwierdzono we wprowadzeniu do opracowania rezultaty postępowań diagnostycznych stanowią podstawy należycie sporządzonych opracowań ekspertyzowych przydatnych do celów, którym mają służyć. Poniżej, za autorami prac [4, 7], podano zasady ogólne, które warto wziąć pod uwagę w tych postępowaniach.

Istniejące konstrukcje żelbetowe należy oceniać zgodnie z aktualnymi normami. Wcześniejsze normy, obowiązujące w okresie projektowania tych konstrukcji, mogą stanowić tylko tzw. „tło” informacyjne. Poziomy bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji nie powinny być niższe od poziomów wymaganych przy projektowaniu nowych konstrukcji.

Postępowaniom diagnostycznym mogą być poddane, w zależności od potrzeb, całe konstrukcje żelbetowe albo tylko wybrane ich elementy, na przykład uszkodzone albo przewidziane do zmian konstrukcyjnych lub napraw albo do modernizacji. W takich przypadkach postępowaniami diagnostycznymi należy objąć też inne elementy konstrukcji, w stosunku do których istnieje podejrzenie, że mogło ulec dla nich obniżenie wymaganych poziomów niezawodności i bezpieczeństwa użytkowania.

W badaniach konstrukcji żelbetowych lub elementów składowych tych konstrukcji należy uwzględnić rzeczywisty stan i rzeczywiste warunki ich pracy.

Wybór metod i technik diagnostycznych należy dostosować do warunków i stanu technicznego diagnozowanych konstrukcji. Szczególnie polecane są metody nieniszczące i seminiszczące. W wyjątkowych sytuacjach można zastosować obciążenia próbne. Stosowane metody powinny zapewnić uzyskanie wyników o wymaganej dokładności i na tyle

of both a required accuracy and of a numerous enough amount so that statistical evaluation required by the standard provisions is possible.

Local inspections and visual examinations of reinforced concrete structures that are in use or excluded from use should be preceded by an analysis of the available technical documentation and other documents, which include, among others: building permit designs; detailed execution designs; other available projects, which were developed in the past and concern renovations, modernizations or adaptation; construction logs; logbooks; and also opinions, judgments and expert reports about the construction. The source of information may also be interviews conducted with contractors of constructions, users, managers, state construction supervisors, etc.

During local inspections and tests, attention should not be paid to factors that currently directly affect the ultimate or serviceability limit states of the assessed reinforced concrete structures, but should be paid to those that indirectly in the long-term can significantly affect safety and reliability. Such factors may include, e.g.: an aggressive environment, a lack of anti-moisture protections, vibrations transmitted from the neighbourhood.

For the safety and reliability of reinforced concrete structures, it is very important to make assessments based on current real data including, among others: dimensions of elements; properties and characteristics of concretes, including their strength and homogeneity; properties and characteristics of reinforcing steels, including their placement; concrete covers; corroding; parameters of prefabricated elements; loads and their character; models (schemes) of work; deformations; location of damage and defects; and also parameters of the soil medium.

3.2. Diagnosis methods and techniques

According to [4, 7], the types of used diagnostic methods and techniques depend, to a large extent, on the physical condition of diagnosed reinforced concrete structures. As mentioned above, methods that enable results with a required accuracy to be obtained in order for tested structures to be statistically evaluated with the accuracy required by relevant regulations, and also current states of the assessed structures to be characterized, should be used.

Very diverse methods and techniques are used in the diagnostics of reinforced concrete structures. The basic groups were classified by the author of

licznym, aby możliwa była ocena statystyczna wymagana przez przepisy normowe.

Wizje lokalne i badania wizualne konstrukcji żelbetowych, zarówno eksploatowanych, jak i wyłączonych z użytkowania, powinno się poprzedzić analizą dostępnej dokumentacji technicznej oraz innych dokumentów, do których należy zaliczyć między innymi: projekty budowlane, projekty wykonawcze, inne dostępne projekty przeprowadzonych w przeszłości remontów albo modernizacji lub adaptacji, dziennik budowy, książkę obiektu, opinie, orzeczenia i ekspertyzy dotyczące konstrukcji. Źródłem informacji mogą być też wywiady przeprowadzone z wykonawcami konstrukcji, z jej użytkownikami i zarządcami, państwowym nadzorem budowlanym itp.

Podczas wizji lokalnych oraz badań należy zwracać uwagę na czynniki, które aktualnie nie wpływają bezpośrednio na stany graniczne nośności lub użytkowalności ocenianych konstrukcji żelbetowych, ale pośrednio, w dłuższym okresie, mogą istotnie wpłynąć na ich bezpieczeństwo i niezawodność. Przykładami takich czynników mogą być: agresywne środowisko, brak zabezpieczeń przeciwwilgociowych, drgania przenoszące się z sąsiedztwa.

Dla bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji żelbetowych jest bardzo istotne, aby oceny dokonywać w oparciu o aktualne rzeczywiste dane obejmujące m.in.: wymiary elementów, właściwości i cechy betonów, w tym ich wytrzymałości i jednorodności, właściwości i cechy stali zbrojeniowych, w tym ich rozmieszczenie, otulenia betonem, skorodowanie, parametry elementów prefabrykowanych, obciążenia i ich charakter, modele (schematy) pracy, odkształcenia, lokalizację uszkodzeń i wad, parametry podłoża gruntowego.

3.2. Metody i techniki diagnozowania

Według prac [4, 7] rodzaje stosowanych metod i technik diagnozowania zależą w dużym stopniu od warunków i stanów technicznych diagnozowanych konstrukcji żelbetowych. O czym już wcześniej powiedziano powinno się stosować metody pozwalające na uzyskanie rezultatów o wymaganych dokładnościach, umożliwiające statystyczne oceny badanych konstrukcji z dokładnością wymaganą przez stosowane przepisy, pozwalających na scharakteryzowanie aktualnych stanów ocenianych konstrukcji.

W diagnostyce konstrukcji żelbetowych wykorzystuje się bardzo różnicowane metody i techniki.

paper [2], and are illustrated in Figure 2. The group of methods classified as physical uses physical phenomena; chemical methods use chemical processes; and biological methods are related to biological processes.

Podstawowe wśród nich grupy sklasyfikowane zostały przez autora pracy [2], czego ilustracją jest rysunek 2. Grupa metod zaliczanych do fizycznych wykorzystuje zjawiska fizyczne, metody chemiczne posługują się procesami chemicznymi, a biologiczne związane są z procesami biologicznymi.

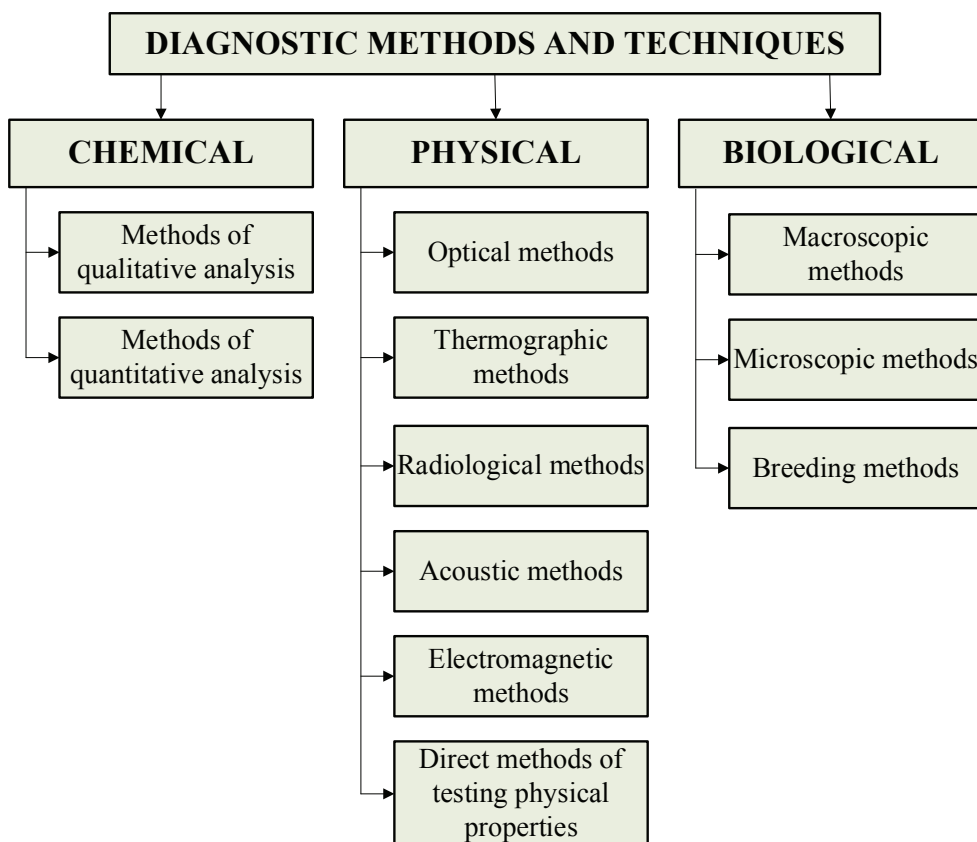


Fig. 2. Basic diagnostic methods and techniques of reinforced concrete structures, on the basis of [2].
Rys. 2. Podstawowe metody i techniki diagnostyczne konstrukcji żelbetowych, na podstawie [2]

The groups listed in Figure 2 have a relatively large number of diagnostic methods and measurement techniques assigned to them. They are summarized in Table 2, which is also based on paper [2]. Areas of suitability regarding geometry studies, tests of the properties of construction materials, and also detecting and identifying damage, including gaining information on whether the methods are basic in the sense of universal applicability or complementary, were determined for these methods.

Wyszczególnionym na rysunku 2 grupom przyporządkowano stosunkowo dużą liczbę metod diagnostycznych i technik pomiarowych, zestawiając je w tabeli 2. W tym wypadku też bazowano na pracy [2]. Określono dla tych metod obszary przydatności w badaniach geometrii, w badaniach właściwości materiałów konstrukcji, w wykrywaniu oraz identyfikacji uszkodzeń, wraz z podaniem informacji, czy dane metody są podstawowe w rozumieniu powszechności stosowania, czy uzupełniające.

Table 2. Measuring methods and techniques that are useful in diagnosing reinforced concrete structures [2]
 Tabela 2. Metody i techniki pomiarowe przydatne w diagnozowaniu konstrukcji żelbetowych [2]

Diagnostic methods and techniques	Geometry			Material properties							Damage					
	Spatial shape	Dimensions of elements	Identification of reinforcement	Type of material	Strength/homogeneity	Deformation modulus	Porosity/absorbability	Frost resistance	Humidity	Chemical composition	Deformations	Material destruction	Material losses	Discontinuity of the material	Pollution	Position changes
PHYSICAL																
Direct visual tests	●	○		●					○		●	○	●	●	●	●
Indirect visual tests	●	○		●					○		●	○	●	●	●	●
Surveying methods	●	●									●		○			●
Laser methods	●	●									●					●
Thermographic methods			○						○			○	○	○		
Radiographic methods			●									○	●	●		
Radioscopic methods			○									○	●	●		
Computed tomography			●									○	●	●		
Impulse methods		●					●	●				○	●	●		
Ultrasonic methods		●					●	●				○	●	●		
Ultrasonic tomography			○									○	●	●		
Acoustic emission														●		
Magnetic methods			●													
Radar methods	○	○	●									○	●	●		
Electromagnetic induction methods			●													
Measurements of electrical potential									○			●	●			
Measurements of electrical resistance									○			●	●			
Direct geometric measurements	●	●	○								●	○	●	●	●	●
Penetrant methods					●							○				
Sclerometric methods					●	○						○				
Pressure methods							●					●				
Field methods for testing physical properties					●	●						●				
Laboratory methods for testing physical properties				●	●	●	●	●	●			●				
CHEMICAL																
Methods of qualitative chemical analysis				○						○		○			○	
Methods of quantitative chemical analysis				●						●		●			●	
BIOLOGICAL																
Macroscopic methods												●			●	
Microscopic methods												●			●	
Breeding methods												○			○	
Designation: ● – Basic mechanism; ○ – Additional mechanism																

3.2.1. Non-destructive methods and techniques

Among the available methods and diagnostic techniques, non-invasive and non-destructive methods, the use of which does not disturb the constructions of tested structures, are of great usefulness with respect to reinforced concrete constructions. Figure 3 shows the general division of the non-destructive methods that are useful in the diagnostics of the durability, safety and reliability of reinforced concrete structures [9].

In turn, Figure 4 contains a detailed summary of non-destructive methods that are useful in the assessment of strength and homogeneity of concrete, whereas Figure 5 shows a list of non-destructive and semi-destructive methods that are useful when assessing features other than strength [11]. Short descriptions of some of the methods listed in Figures 3-5, including those currently considered as modern, are listed below. Detailed descriptions of most of the methods mentioned in Figures 3-5 can be found, among others, in papers [2, 7, 8, 10].

3.2.1. Metody i techniki nieniszczące

Spośród dostępnych metod i technik diagnostycznych dużą przydatnością w odniesieniu do konstrukcji żelbetowych cechują się metody nieinwazyjne, nieniszczące, których stosowanie nie powoduje naruszenia struktur badanych konstrukcji. Rysunek 3 przedstawia ogólny podział nieniszczących metod przydatnych w diagnostykach prowadzonych na użytek trwałości, bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji żelbetowych [9]. Z kolei rysunek 4 zawiera szczegółowe zestawienie metod nieniszczących przydatnych do oceny wytrzymałości i jednorodności betonu, a rysunek 5 zestawienie metod nieniszczących i seminiszczących przydatnych do oceny innych cech niż wytrzymałość [11]. Krótkie sygnałne opisy niektórych z wyszczególnionych na rysunkach 3-5 metod, w tym tych uznawanych obecnie za nowoczesne, zamieszczono poniżej. Szczegółowe opisy większości wymienionych na rysunkach 3-5 metod można znaleźć między innymi w pracach [2, 7, 8, 10].

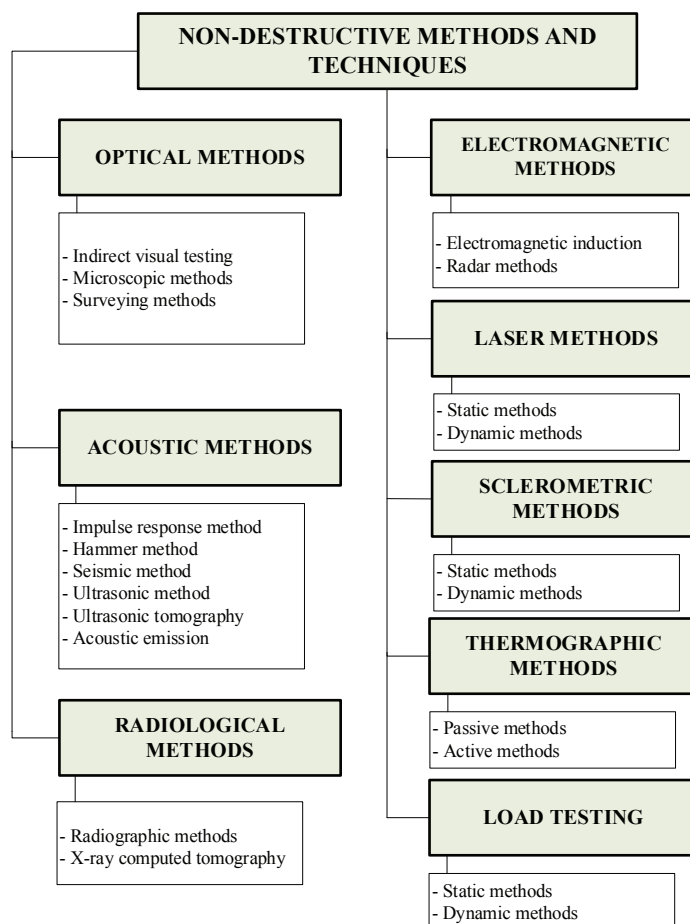


Fig. 3. General classification of non-destructive methods and techniques that are useful in the diagnosis of reinforced concrete structures according to [9]

Rys. 3. Ogólna klasyfikacja nieniszczących metod i technik przydatnych w diagnostykach konstrukcji żelbetowych, wg [9]

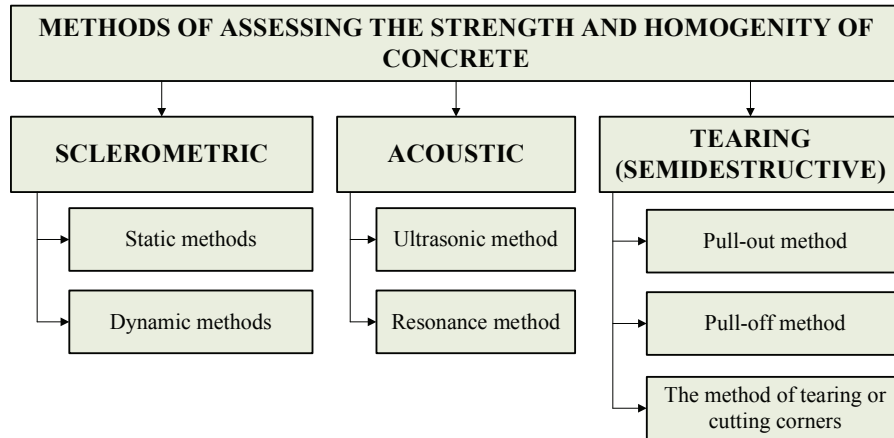


Fig. 4. Non-destructive and semi-destructive methods that are used to assess the strength and homogeneity of concrete in reinforced concrete constructions according to [11]

Rys. 4. Metody nieniszczące i seminieniszczące stosowane do oceny wytrzymałości i jednorodności betonu w konstrukcjach żelbetowych, wg [11]

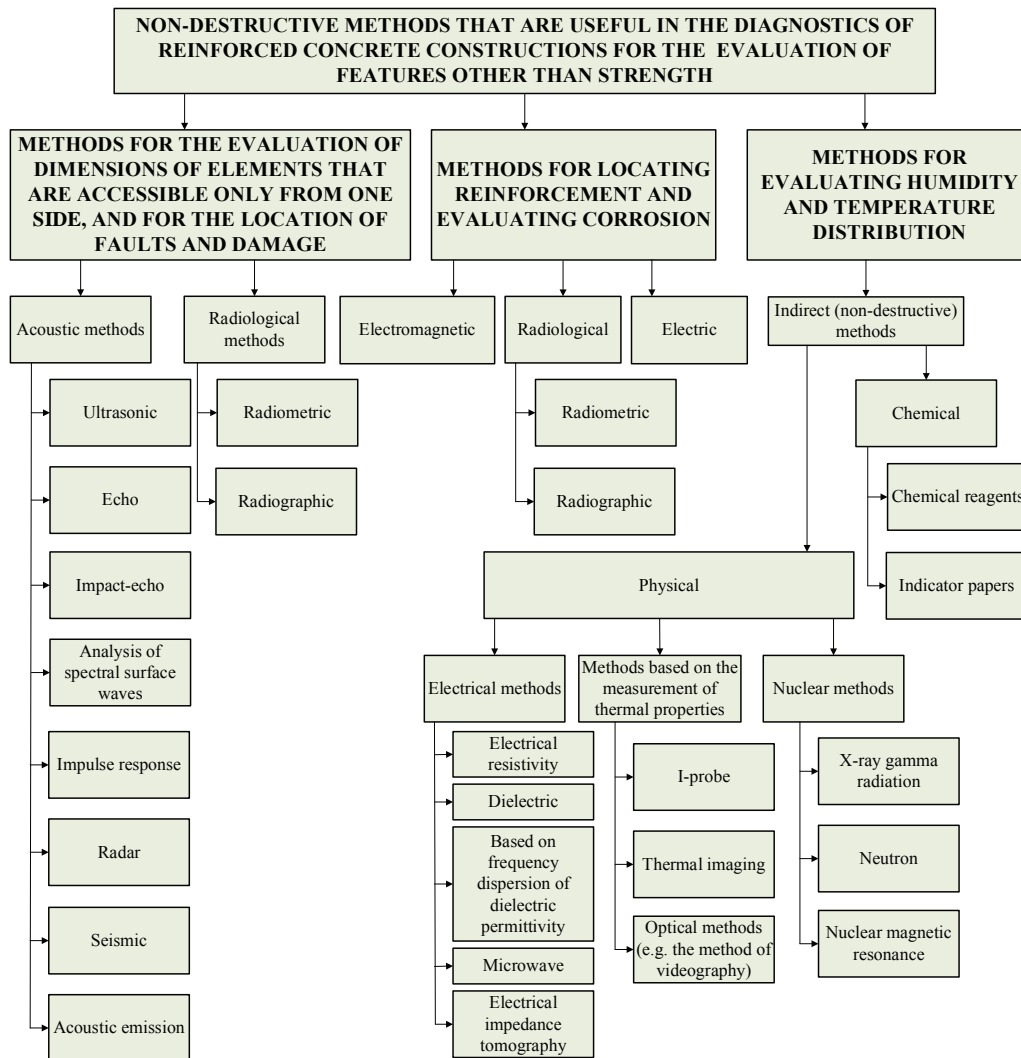


Fig. 5. Non-destructive methods that are used in the diagnostics of reinforced concrete structures in order to assess features other than strength [11]

Rys. 5. Metody nieniszczące stosowane w diagnostyce konstrukcji żelbetowych do oceny innych cech niż wytrzymałość [11]

Optical methods. As can be seen in the classification presented in Figure 3, the optical methods that are useful in the diagnosis of reinforced concrete structures include many measurement techniques that use research equipment in the form of, among others, endoscopes, borescopes, or videoscopes. They enable surfaces and places that are inaccessible to the eye to be tested in the same way as microscopes that are useful in laboratory conditions. In addition, these groups of methods should also include laser scanning.

This modern method of performing geodetic survey measurements enables the location of a set of points in three-dimensional space to be remotely determined, which gives an opportunity to reconstruct a three-dimensional image (shape) of whole building objects or their fragments, including a structure that is visible for a laser [2]. This method can be used, e.g. for remote measurement of progressive deflections of either selected structural elements or an entire reinforced concrete structure. Research can be repeated over time, and their results can be compared to each other and analysed within a framework of the assessed safety and reliability of a structure. The exemplary diagnostic apparatus that is used in optical methods is shown in Figure 6.

Metody optyczne. Jak wynika z klasyfikacji przedstawionej na rysunku 3 do metod optycznych, przydatnych w diagnostykach konstrukcji żelbetowych zaliczyć można wiele technik pomiarowych wykorzystujących aparaturę badawczą w postaci m.in. endoskopów, boroskopów, wideoskopów umożliwiającą badanie powierzchni i miejsc niedostępnych dla oka, a także mikroskopy użyteczne w warunkach laboratoryjnych. Ponadto do tej grupy metod zaliczyć należy skaning laserowy. Ta nowoczesna metoda pomiarów geodezyjnych umożliwia zdalne wyznaczenie położenia zbioru punktów w przestrzeni trójwymiarowej, co daje możliwość rekonstrukcji trójwymiarowego obrazu (ukształtowania) całych obiektów budowlanych lub ich fragmentów, w tym widocznej dla lasera konstrukcji [2]. Metoda ta może zostać wykorzystana na przykład do zdalnego pomiaru postępujących ugięć wybranych elementów konstrukcyjnych lub całych konstrukcji żelbetowych. Badania mogą być powtarzane w czasie, a ich rezultaty porównywane względem siebie i analizowane w ramach ocenianego bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji. Przykładowe aparaty diagnostyczne stosowane w metodach optycznych pokazane zostały na rysunku 6.



Fig. 6. Exemplary apparatus used in optical methods (materials from the website: www.olympus-ims.com)

Rys. 6. Przykładowe aparaty stosowane w metodach optycznych (materiały ze strony internetowej: www.olympus-ims.com)

Acoustic methods. The following acoustic non-destructive test methods, which are useful in assessing the durability, safety and reliability of reinforced concrete structures (Figs. 3 and 5), were characterized: ultrasonic, impulse response, hammer, ultrasonic tomography, acoustic emission.

Ultrasonic methods have been known for a long time and used indirectly in reliable assessments of the strength and homogeneity of concrete in a construction [12-15]. They can also be used to detect structural

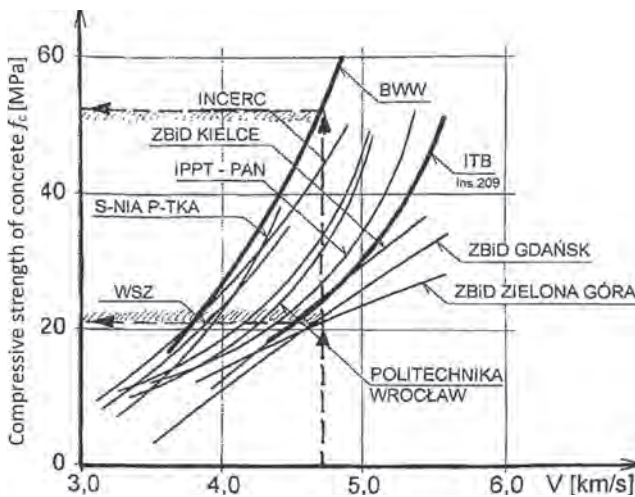
Metody akustyczne. Z wymienionych na rysunkach 3 i 5 akustycznych nieniszczących metod badawczych przydatnych do oceny trwałości, bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji żelbetowych scharakteryzowano metody: ultradźwiękową, odpowiedzi na impuls, młoteczkową, sejsmiczną, tomografii ultradźwiękowej, emisji akustycznej.

Metody ultradźwiękowe – są znane od dawna i stosowane do wiarygodnych ocen, w sposób pośredni, wytrzymałości i jednorodności betonu w konstrukcji [12-15]. Mogą być także wykorzystywane do wykry-

discontinuities in reinforced concrete elements in the form of cracks, and also to locate air voids [16]. Apparatus consisting of an ultrasonic pulse analyzer and ultrasonic heads is commonly available.

The determination of the velocity of longitudinal ultrasonic waves v_c that propagate in the tested concrete, followed by correlating them with the compressive strength f_c that was obtained on the basis of strength tests of specimens taken from a structure, is required in order to assess the strength of concrete. The results of concrete strength measurements should be validated using the calibration of the method, which involves the selection of an appropriate correlation or hypothetical dependency of v_c-f_c . The correct application of these methods requires strict adherence to the principles of conducting research, which were included in paper [12], and also paper [13], in which a detailed procedure of in situ concrete ultrasonic testing is given. In addition, standards [14, 15] should also be adhered to.

Exemplary research relationships, according to ultrasonic methods, which are used to assess concrete strength, are given in Figure 7. They justify the need for the approximate scaling of the method.



wania nieciągłości strukturalnej w elementach żelbetowych w postaci pęknięć oraz do lokalizowania pustek powietrznych [16]. Aparatura składająca się z betonoskopu i głowic ultradźwiękowych jest powszechnie dostępna. Do oceny wytrzymałości betonu wymagane jest określenie prędkości podłużnych fal ultradźwiękowych v_c rozprzestrzeniających się w badanych betonach i skorelowanie ich z wytrzymałością na ściskanie f_c uzyskaną na podstawie badań wytrzymałościowych próbek pobranych z konstrukcji. Wyniki pomiarów wytrzymałości betonu w konstrukcji należy uwiarygodnić poprzez wzorcowanie metody, polegające na doborze odpowiedniej zależności korekcyjnej lub hipotetycznej v_c-f_c . Prawidłowe stosowanie tych metod wymaga bezwzględnego przestrzegania zasad prowadzenia badań zebranych w pracy [12], a także w pracy [13], w której podana jest szczegółowa procedura badań ultradźwiękowych betonu *in situ*. Ponadto obowiązują normy [14, 15].

Przykładowe zależności badawcze według metod ultradźwiękowych do oceny wytrzymałości betonu podano na rysunku 7. Uzasadniają one potrzebę przybliżonego skalowania metody.

Fig. 7. Examples of characteristic dependencies of $f_c - V$ for the ultrasonic method (for different concretes and different places)

Rys. 7. Przykłady charakterystycznych zależności $f_c - V$ dla metody ultradźwiękowej (dla różnych betonów i różnych ośrodków)

Impulse response methods are useful, among others, for the detection of air voids under reinforced concrete slabs that are laid on the ground, the detection of delamination at the interface of layers, and also the detection of places and areas of high heterogeneity of a concrete structure in massive concrete elements (so-called honeycombing [9]). The research sets that are shown in Figure 8 and that are used in these methods include: special hammers, geo-receivers, and also amplifiers with portable computers that have appropriate software.

Metody odpowiedzi na impuls (impulse response) są przydatne m.in. do wykrywania pustek powietrznych pod płytami żelbetowymi ułożonymi na gruncie, delaminacji na stykach warstw, miejsc wadliwych i obszarów o dużej niejednorodności struktury betonu w masywnych elementach betonowych (tzw. honeycombing [9]). W skład zestawów badawczych pokazanych na rysunku 8 wykorzystywanych w tych metodach wchodzi: specjalne młotki, geosłuchawki i wzmacniacze z przenośnymi odpowiednio oprogramowanymi komputerami.

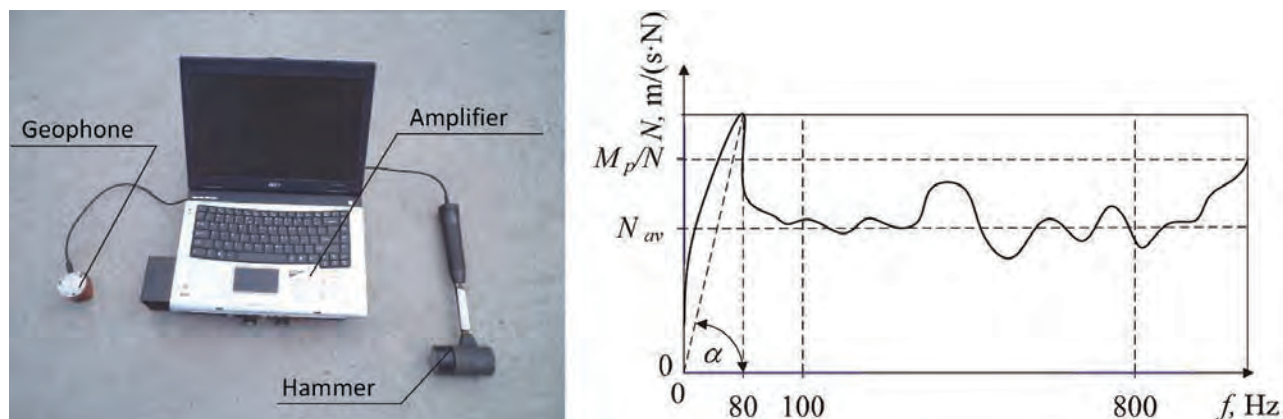


Fig. 8. Impulse response method: a) measurement set, b) exemplary graph of the variability of the N_{av} parameter in a frequency function

Rys. 8. Metoda odpowiedzi na impuls (impulse response): a) zestaw pomiarowy, b) przykładowy wykres zmienności parametru N_{av} w funkcji częstotliwości

In these methods, elastic waves are excited in the tested elements by the impact of a calibrated hammer with a built-in rubber tip. The registration of the elastic wave signal that is propagating in the element with a frequency of up to 1000 Hz takes place with the reinforcement of the signal by an amplifier and with the use of geo-receivers that do not require the use of an acoustic coupler with the surface of the tested element.

The processing of signals, which were registered during tests, takes place using specialized software. The final result of the tests are the so-called “maps” of the distributions of the characteristic surface parameters of the tested elements, namely: average mobility N_{av} , dynamic stiffness K_d , mobility slope M_p , average mobility multiplied by mobility slope $N_{av} \times M_p$ and voids index v - all obtained for the tested surfaces. Defective regions can be located on the basis of the analysis of these maps.

Impact-echo methods are useful, among others, for determining the thickness of concrete and reinforced concrete elements that are accessible from one side, and also for detecting defects in them [17].

The methods are based on the excitation of elastic waves in the assessed elements by hitting their surfaces in measuring points spaced approximately every 100 mm using inductors in the form of steel balls. The frequencies of generated vibrations depend on the diameters of the used balls, and they range from approximately 10 kHz to 150 kHz. Specialized software enables images of the elastic waves propagating in the examined elements to be recorded in the amplitude-time system, and then the transforming of these images into an amplitude-

W metodach tych dokonuje się wzbudzenia fal sprężystych w badanych elementach poprzez uderzenie skalibrowanym młotkiem z wbudowaną gumową końcówką. Rejestracja sygnału fali sprężystej rozprzestrzeniającej się w elemencie o częstotliwości do 1000 Hz następuje z użyciem geosłuchawki, niewymagającej użycia środka sprzęgającego akustycznie z powierzchnią badanego elementu, z równoczesnym jego wzmocnieniem za pomocą wzmacniacza. Przetwarzanie zarejestrowanych podczas badań sygnałów następuje za pomocą specjalistycznego oprogramowania. Ostatecznym wynikiem badań są tzw. „mapy” rozkładów wartości charakterystycznych parametrów powierzchni badanych elementów, mianowicie: średnich zmienności N_{av} (average mobility), sztywności dynamicznych K_d (stiffness), skoków zmienności M_p (mobility slope), średnich zmienności pomnożonych przez skoki zmienności $N_{av} \times M_p$ (mobility times mobility slope) oraz współczynników wad v (voids index), otrzymane dla badanych powierzchni. Na podstawie analizy tych map można lokalizować rejony wadliwe.

Metody młoteczkowe (impact-echo) przydatne są między innymi do określania grubości elementów betonowych i żelbetowych dostępnych jednostronnie oraz wykrywania w nich defektów [17].

Metody bazują na wzbudzeniu w badanych elementach fal sprężystych, poprzez uderzenia w ich powierzchnię wzbudnikami w postaci kulek stalowych, w punktach pomiarowych rozmieszczonych co około 100 mm. Częstotliwości wygenerowanych drgań zależą od średnic użytych w badaniach kulek i wynoszą od około 10 kHz do 150 kHz. Specjalistyczne oprogramowania umożliwiają zapisy graficzne obrazów fal sprężystych rozprzestrzeniających się w badanych elementach,

frequency spectrum using the fast Fourier transform. These spectra are subjected to further analysis. The advantages of these methods include the high accuracy in locating defects, which results from the small distance between measuring points. However, a disadvantage involves the inability to assess the size of water-filled defects. A measuring set, which consists of measuring heads with inductors (steel balls with different diameters) and a portable computer, is shown in Figure 9.

w układzie amplituda – czas, a następnie przekształcenie tego obrazu w widmo amplitudowo-częstotliwościowe za pomocą szybkiej transformaty Fouriera. Widma te podlegają dalszym analizom. Zaletą tych metod są duże dokładności w zlokalizowaniu wad wynikające z małej odległości między punktami pomiarowymi, natomiast niedogodnością jest brak możliwości oceny rozmiarów wad wypełnionych wodą. Zestaw pomiarowy, w skład którego wchodzi głowice pomiarowe ze wzbudnikami (kulki stalowe o różnych średnicach) i komputer przenośny, przedstawiono na rysunku 9.

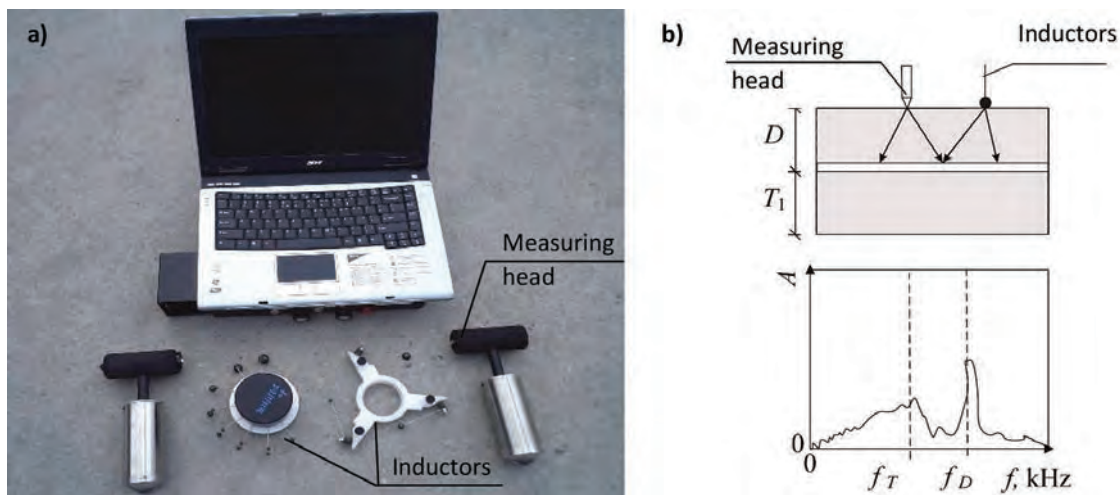


Fig. 9. The impact-echo method: a) measurement set, b) exemplary amplitude and frequency spectrum obtained in the case of the occurrence of a defect in the tested element

Rys. 9. Metoda młoteczkowa (impact-echo): a) zestaw pomiarowy, b) przykładowe widmo amplitudowo-częstotliwościowe otrzymane w przypadku istnienia w badanym elemencie wady

Parallel seismic methods are useful when testing concrete and reinforced concrete foundation piles, both prefabricated and those made at the installation site, regarding verification of their length and continuity of their cross-section along their length [18]. In these methods, a hole deeper than the predicted length of elements is required to be drilled in the ground along the tested element. A hydrophone, which works in the frequency range close to 40kHz, is then placed in these holes. Afterwards, a pile head or pile cap is hit with a calibrated hammer.

By using a hydrophone that is moving in the hole along the pile, the time of transition of the acoustic wave from the test pile to the hydrophone is recorded after each hit. Analysis of the time of passing of this wave with the use of specialized software allows the length and continuity of the cross-section of the tested pile to be determined. Figure 10 shows, according to paper [18], the measurement set that is used in the parallel seismic method, and also an exemplary scheme of testing a pile.

Metody sejsmiczne (parallel seismic) – są przydatne do badania betonowych i żelbetowych pali fundamentowych, zarówno prefabrykowanych, jak i wykonanych w miejscu wbudowania, w zakresie kontroli ich długości i ciągłości przekroju na długości [18]. W metodach tych wymagane jest wykonanie w gruncie, wzdłuż badanego elementu, otworu na głębokość większą niż przewidywane długości elementów. W otworach tych umieszcza się hydrofon pracujący w paśmie częstotliwości zbliżonym do 40 kHz i z użyciem skalibrowanego młotka dokonuje się uderzeń w głowicę pala lub w oczep zespołu pali. Wykorzystując hydrofon przemieszczający się w otworze wzdłuż pala, rejestruje się, po każdym uderzeniu, czas przejścia fali akustycznej z badanego pala do hydrofonu. Analizy czasu przejścia tej fali, za pomocą specjalistycznego oprogramowania, umożliwiają określenie długości i ciągłości przekroju badanego pala. Na rysunku 10 pokazano za [18] zestaw pomiarowy stosowany w metodzie parallel seismic i przykładowy schemat badania pala.

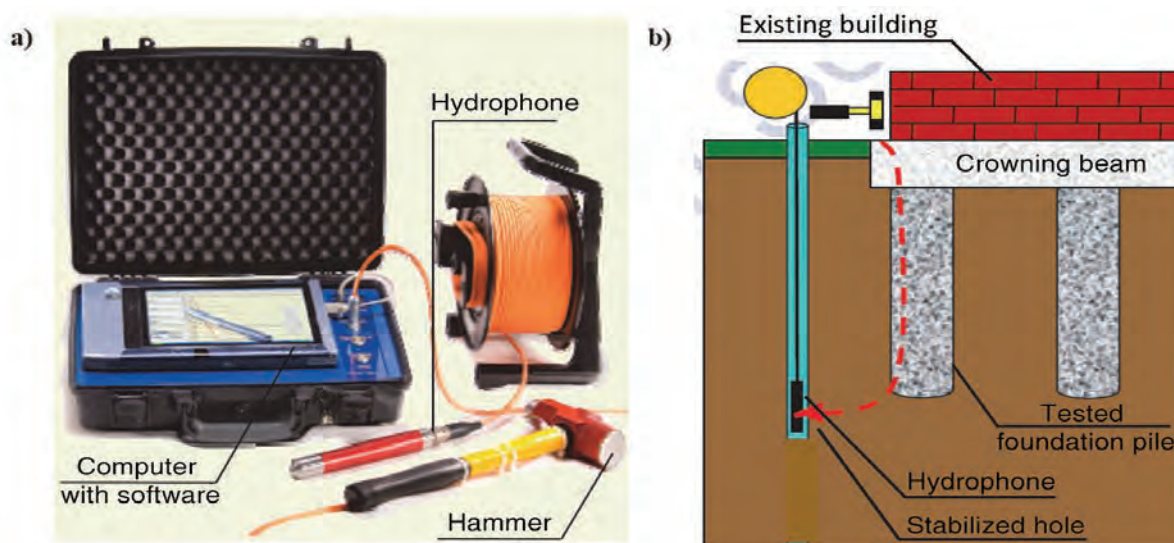


Fig. 10. The parallel seismic method according to [18]: a) measurement set, b) exemplary test scheme

Rys. 10. Metoda sejsmiczna (parallel seismic): a) zestaw pomiarowy, b) przykładowy schemat badania, za [18]

Ultrasonic tomography methods are the newest of the acoustic methods [2, 9, 18, 19]. They are useful when examining concrete and reinforced concrete elements that are only accessible from one side and have a thickness of up to 2,500 mm. Ultrasonic tomography enables the thickness of such elements to be determined; reinforcement distribution consisting of several layers of meshes to be detected; and invisible cracks, inclusions, air voids, and areas filled with liquid or other material that differs in terms of physical properties from the surrounding concrete [9, 10] to be investigated.

The methods are based on the excitation and analysis of elastic waves in the examined elements. The inductors are multi-head antennas, which have several dozen independent spring-mounted ultrasonic heads installed, and which also are used to receive and process ultrasonic signals. The heads generate ultrasonic impulses of 50 kHz. Figure 11 shows an ultrasonic tomograph, which consists of a special multi-head ultrasonic antenna and computer with specialized software that enables a graphic image to be recorded [9].

With the use of a tomograph it is possible to obtain views in any cross-section in three mutually perpendicular cross-sections and also a spatial image of the examined element. However, interpretation of the obtained results is very difficult in many situations. In these methods, the use of apparatus that “couples” the surface of the tested element with ultrasonic heads is not required, which is a very important advantage. Dry point contacts are used in this case.

Metody tomografii ultradźwiękowej są najnowszymi spośród metod akustycznych [2, 9, 18, 19]. Są przydatne do badania dostępnych jednostronnie elementów betonowych i żelbetowych o grubości do 2500 mm, w celu określenia ich grubości, wykrycia rozmieszczenia zbrojenia składającego się na przykład z kilku warstw siatek, wykrycia niewidocznych na powierzchni pęknięć, obcych wtrąceń pustek powietrznych albo obszarów wypełnionych cieczą lub materiałem różniącym się właściwościami fizycznymi od otaczającego go betonu [9, 10].

Metody bazują na wzbudzeniu i analizie fal sprężystych w badanych elementach. Wzbudnikami są wielogłowicowe anteny, mające wbudowanych kilkadziesiąt niezależnych głowic ultradźwiękowych zamocowanych sprężynowo, które służą również do odbierania i przetwarzania sygnałów ultradźwiękowych. Głowice generują impulsy ultradźwiękowe o częstotliwości 50 kHz. Na rysunku 11 przedstawiono tomograf ultradźwiękowy, w skład którego wchodzi specjalna wielogłowicowa antena ultradźwiękowa i komputer wraz ze specjalistycznym oprogramowaniem umożliwiającym zapis graficznego obrazu [9].

Z pomocą tomografu możliwe jest uzyskanie zobrażeń w dowolnym przekroju w trzech wzajemnie prostopadłych przekrojach oraz przestrzennego obrazu badanego elementu, ale interpretacja uzyskanych rezultatów w wielu sytuacjach jest mocno utrudniona. W metodach tych nie jest wymagane stosowanie środka „sprzęgającego” powierzchnię badanego elementu z głowicami ultradźwiękowymi, co jest bardzo istotną zaletą. Stosowane są tu suche styki *dry point contact*.

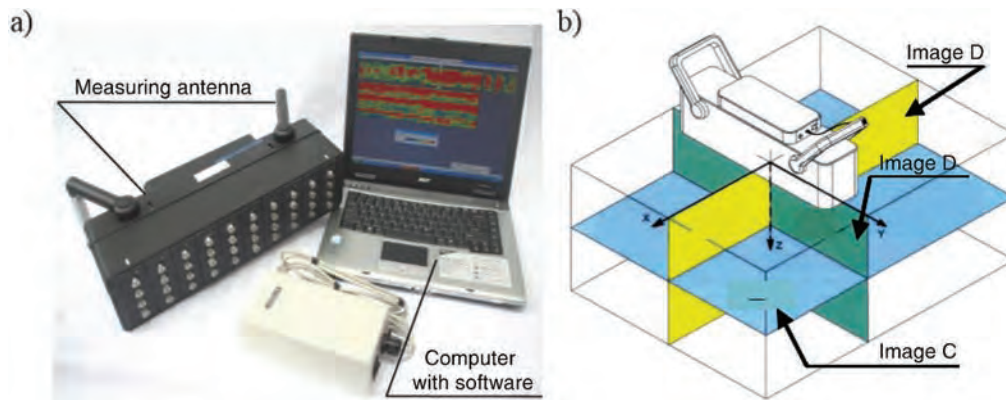


Fig. 11. View of the ultrasonic tomograph according to [9]: a) measurement set, b) measuring antenna in the coordinate system and images that are possible to be obtained

Rys. 11. Widok tomografu ultradźwiękowego: a) zestaw pomiarowy, b) antena pomiarowa w układzie współrzędnych i możliwe do uzyskania zobrazowania, za [9]

Methods of acoustic emission include measurement methods that use the phenomenon of the formation and propagation of high-frequency elastic waves in the structure of a material, which are caused by loads. These can be statically increasing loads, multi-variable, or dynamic loads, but also non-mechanical loads [20]. These methods are suitable for diagnostics and the monitoring of reinforced concrete elements and constructions in use, as well as structural elements subjected to trial loads. They are useful in assessing the safety and reliability of reinforced concrete structures, because they enable, among others, the location and identification of damage arising in the tested elements. Significant for these methods is that they signal the development of destructive processes that can cause, e.g. destruction, much earlier than other methods, and thus provide the time needed to relieve the structure. An interpretation of the research results obtained using these methods requires a lot of experience, which in Polish conditions have, among others, the authors of papers [21-23].

Electromagnetic methods. The non-destructive electromagnetic methods listed in Figure 3 include the Ground Penetrating Radar (GPR) that is described below. This method is used to determine or detect in concrete and reinforced concrete elements that are accessible from only one side, especially slab structures, the following: thickness, delamination, extensive defects, and the location of reinforcing bars [24]. The testing heads - transmitting and receiving heads (antennas) - depending on the purpose of the radar, generate electromagnetic waves with frequencies from 0.1 to 2.5 GHz.

The apparatus can move on the surface of the tested element. It is connected to a data recorder by a

Metody emisji akustycznej – pod tą nazwą należy rozumieć metody pomiarowe wykorzystujące zjawisko powstawania i rozprzestrzeniania się fal sprężystych wysokiej częstotliwości w strukturze materiału, powodowanych obciążeniem. Mogą to być obciążenia narastające statycznie, wielokrotnie zmienne, dynamiczne, ale też i obciążenia niemechaniczne [20]. Metody nadają się do diagnostyki i monitoringu zarówno eksploatowanych elementów i konstrukcji żelbetowych, jak i elementów konstrukcji poddawanych obciążeniom próbnym. Są one użyteczne w ocenie bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji żelbetowych, bo umożliwiają m.in. lokalizację i identyfikację uszkodzeń powstających w badanych elementach. Znamienne dla tych metod jest to, że znacznie wcześniej niż inne metody sygnalizują rozwój procesów destrukcyjnych mogących spowodować na przykład zniszczenie, dając w ten sposób czas potrzebny do odciążenia konstrukcji. Interpretacja wyników badań uzyskiwanych tymi metodami wymaga dużego doświadczenia, które w warunkach polskich posiadają m.in. autorzy prac [21-23].

Metody elektromagnetyczne. Z nieniszczących metod elektromagnetycznych wymienionych na rysunku 3 przybliżono radarową GPR (Ground Penetrating Radar). Metoda ta wykorzystywana jest do określenia lub wykrywania w dostępnych jednostronnie betonowych i żelbetowych elementach, zwłaszcza płytowych: grubości, rozwarstwień, rozległych wad, usytuowania prętów zbrojeniowych [24]. Głowice badawcze, nadawczo-odbiorcze (anteny), w zależności od przeznaczenia radaru, generują fale elektromagnetyczne o częstotliwości od 0,1 GHz do 2,5 GHz.

Aparatura może przemieszczać się po powierzchni badanego elementu. Z rejestratorem danych połączona jest kablem transmisyjnym lub połączeniem ra-

transmission cable or a radio connection. The advantage of this method is the ability to quickly examine elements with large surfaces, especially with regards to the location of reinforcements, while the disadvantage is the small accuracy of determining the diameter and thickness of the reinforcement cover. Figure 12 shows an example of a radar set according to [9].

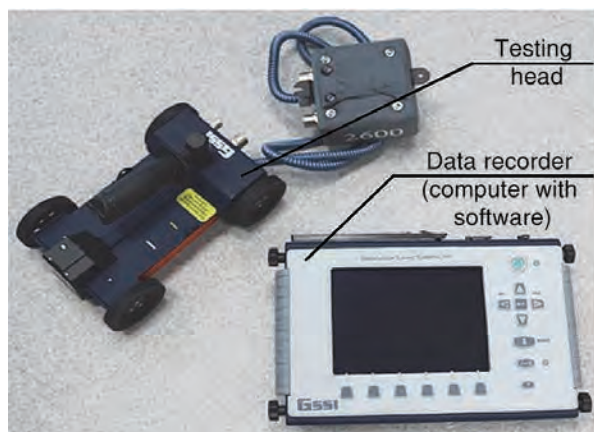


Fig. 12. Radar set and exemplary display showing the distribution of the reinforcement in a model reinforced concrete element according to [9]

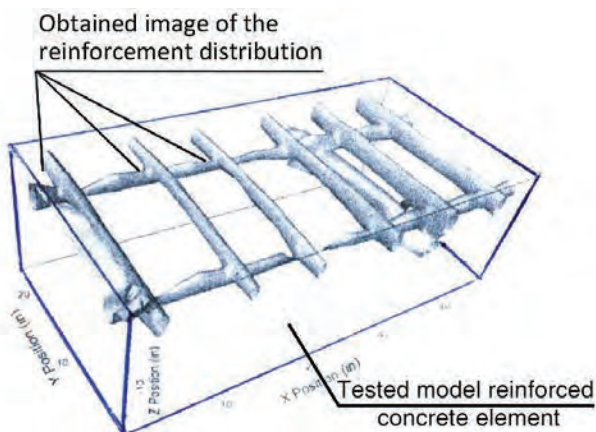
Rys. 12. Zestaw radarowy i przykładowe zobrazowanie pokazujące rozmieszczenie zbrojenia w modelowym elemencie żelbetowym, za [9]

Sclerometric methods. As was the case with ultrasonic methods, these methods have also been known for a long time and have been used to reliably indirectly evaluate the strength and homogeneity of concrete in a structure. In dynamic practice, the dynamic method dominates, in which the Schmidt sclerometer is a commonly used measuring device. In this method, a parameter in the form of the so-called number of R rebounds is required to be specified and then correlated with the compressive strength f_c by selecting the appropriate correlation or hypothetical dependence of f_c-R .

Compressive strengths are determined on the basis of tests of specimens that are taken from a structure. The correct application of this method, which ensures the obtaining of reliable results, requires the strict application of the principles of conducting research. These principles are collected in very clearly written papers [7, 13, 25], in which paper [13] includes a detailed procedure of in situ tests of concrete. In addition, there are standards in force [15, 26] that refer to these methods.

Exemplary research dependencies for sclerometric methods, which are used to assess concrete strength, are given in Figure 13. They justify the need for simplified method scaling.

diowym. Zaletą tej metody jest możliwość szybkiego badania elementów o dużych powierzchniach, szczególnie w zakresie lokalizowania zbrojenia, natomiast wadą – mała dokładność określenia średnicy i grubości otuliny zbrojenia. Na rysunku 12 pokazano przykładowy zestaw radarowy [9].



Metody sklerometryczne. Podobnie jak metody ultradźwiękowe znane są od dawna i stosowane do wiarygodnej oceny, w sposób pośredni, wytrzymałości i jednorodności betonu w konstrukcji. W praktyce diagnostycznej dominuje metoda dynamiczna, gdzie powszechnie stosowanym urządzeniem pomiarowym jest sklerometr Schmidta. W metodzie tej wymagane jest określenie parametru w postaci tzw. liczby odbicia R i skorelowanie jej z wytrzymałością na ściskanie f_c poprzez dobór odpowiedniej zależności korelacyjnej lub hipotetycznej f_c-R .

Wytrzymałości na ściskanie określone są na podstawie badań próbek pobranych z konstrukcji. Prawidłowe stosowanie tej metody, zapewniające uzyskanie wiarygodnych rezultatów, wymaga bezwzględnego stosowania zasad prowadzenia badań zebranych w bardzo przystępnie napisanych pracach [7, 13, 25], z tym że w pracy [13] podana została szczegółowa procedura badań betonu *in situ*. Ponadto obowiązują normy [15, 26].

Przykładowe zależności badawcze dla metod sklerometrycznych do oceny wytrzymałości betonu podano na rysunku 13. Uzasadniają one potrzebę uproszczonego skalowania metody.

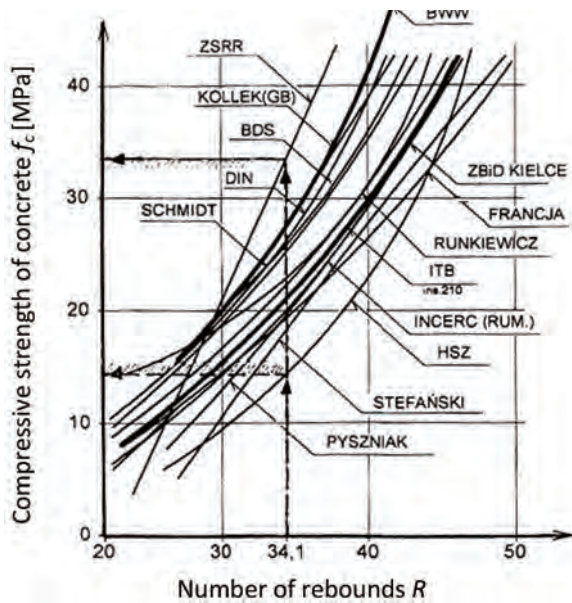


Fig. 13. Exemplary empirical dependencies of $f_c - R$ for Schmidt type N sclerometers (for different concretes and different places)

Rys. 13. Przykładowe zależności empiryczne $f_c - R$ dla sklerometrów Schmidta typu N (dla różnych betonów i różnych ośrodków)

Radiological methods. Radiological methods include the radiographic method [10], which is used, among others, to assess the distribution of reinforcement in reinforced concrete structures. An example of the evaluation of reinforcement in a reinforced concrete beam is shown in Figure 14.

Metody radiologiczne. Wśród metod radiologicznych można wyróżnić metodę radiograficzną [10] służącą m.in. do oceny rozkładu zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych. Przykład oceny zbrojenia w belce żelbetowej pokazano na rysunku 14.

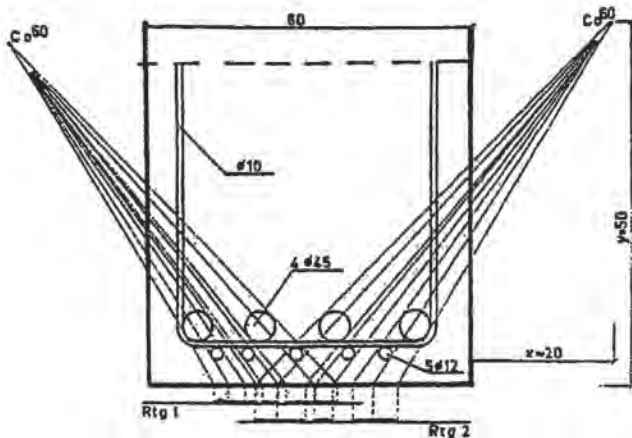


Fig. 14. Evaluation of the bottom reinforcement in a beam (in the middle of the span) using the radiographic method.
Rys. 14. Ocena zbrojenia dolnego w belce (w środku przęsła) za pomocą metody radiograficznej

These methods are standardized and described in many publications.

Metody te są opisane w wielu publikacjach i są znormalizowane.

3.2.2. Semi-destructive methods and techniques

3.2.2. Metody i techniki seminieniszczące

As with non-destructive methods, semi-destructive methods are also very useful in assessing the durability, safety and reliability of reinforced concrete structures. Their use does not significantly interfere with the structure of the examined construction. Figure 15 shows a general classification of basic semi-destructive methods and techniques that are useful

Podobnie jak metody nieniszczące, również metody seminieniszczące cechują się dużą przydatnością w ocenie trwałości, bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji żelbetowych. Ich stosowanie nie powoduje istotnego naruszenia struktury badanej konstrukcji. Rysunek 15 jest propozycją ogólnej klasyfikacji podstawowych metod i technik seminieniszczących

in the diagnosis of reinforced concrete structures according to [9, 11]. There are physical, chemical and biological methods distinguished and divided into those that are useful in field research and those useful in laboratory tests of specimens, including e.g. core specimens taken from a structure.

Table 3 lists the important factors that affect the durability, safety and reliability of using reinforced concrete structures. These factors can be identified using semi-destructive methods. A synthetic description of some of the methods and techniques listed in Figure 15 is provided below, while their detailed descriptions are available, among others, in papers [2, 7, 8].

przydatnych w diagnostyce konstrukcji żelbetowych, wg [9, 11]. Wyróżniono metody fizyczne, chemiczne i biologiczne, z podziałem na przydatne w badaniach polowych (terenowych) oraz stosowane w laboratoryjnych badaniach próbek, w tym na przykład rdzeniowych pobranych z konstrukcji. W tabeli 3 podano natomiast ważniejsze czynniki mające wpływ na trwałość, bezpieczeństwo i niezawodność użytkowania konstrukcji żelbetowych, możliwe do zidentyfikowania za pomocą rozpatrywanych metod seminieniszczących. Syntetycznego omówienia niektórych z wyszczególnionych na rysunku 15 metod i technik zamieszczono poniżej, natomiast szczegółowe ich opisy dostępne są m.in. w pracach [2, 7, 8].

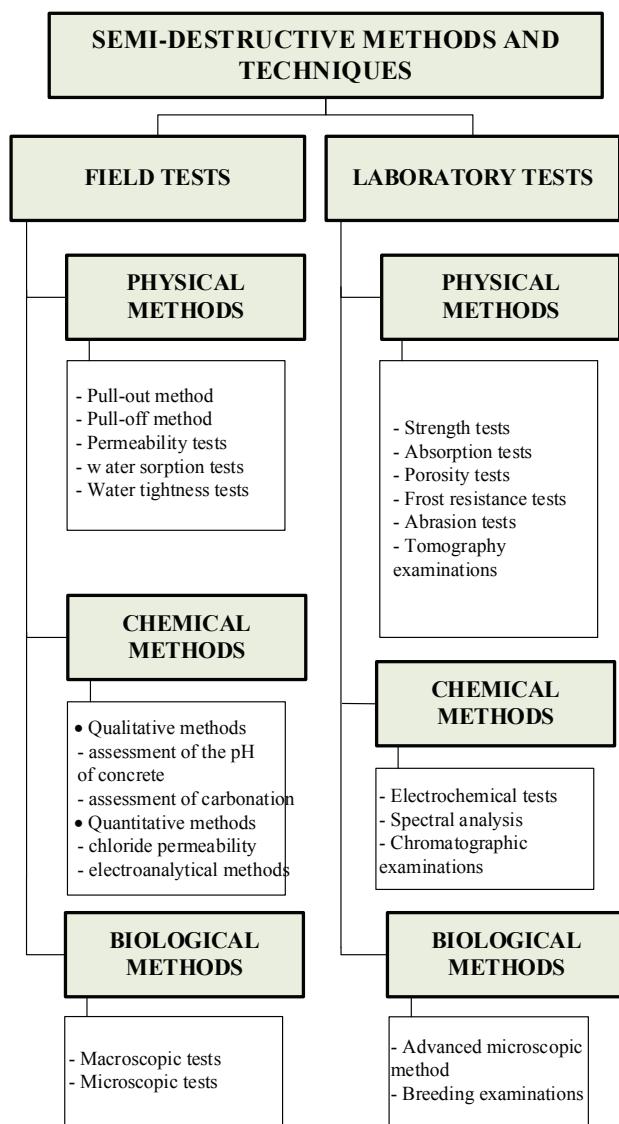


Fig. 15. General classification of semi-destructive methods and techniques that are useful in the diagnosis of reinforced concrete structures according to [9, 11].

Rys. 15. Ogólna klasyfikacja metod i technik seminieniszczących przydatnych w diagnozowaniu konstrukcji żelbetowych, wg [9, 11]

Table 3. Factors that affect the durability, safety and reliability of reinforced concrete structures identified using semi-destructive methods, according to [9]

Tabela 3. Czynniki mające wpływ na trwałość, bezpieczeństwo i niezawodność konstrukcji żelbetonowych, identyfikowane za pomocą metod seminieniszczących, na podstawie [9]

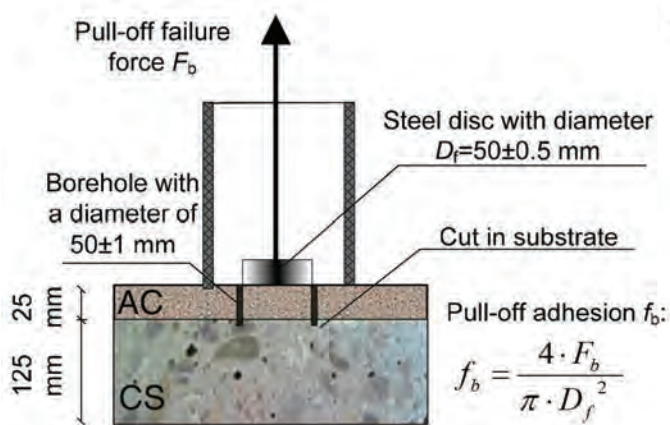
Semi-destructive methods	Factor				
	1 – structure of the material	2 – mechanical parameters of the material	3 – material discontinuity	4 – water and gas resistance	5 – chemical composition
	1	2	3	4	5
FIELD TESTS					
Pull-out method	-	●	-	-	-
Pull-off method	-	●	-	-	-
Torque test	-	●	-	-	-
Penetration methods	-	●	-	-	-
Water tightness tests	○	-	-	●	-
Polarizing methods	-	-	-	-	●
pH test	-	-	-	-	●
Measuring the depth of carbonation	-	-	-	-	●
Alkaline test	-	-	-	-	●
Chloride test	-	-	-	-	●
Electroanalytical test	-	-	-	-	●
Biological macroscopic tests	○	-	○	-	-
Biological microscopic tests	○	-	○	-	-
LABORATORY TESTS					
Determination of compressive strength	-	●	-	-	-
Determination of elastic properties	-	●	-	-	-
Absorption tests	○	-	-	●	-
Porosity tests	●	-	-	●	-
Frost resistance tests	-	●	-	-	-
Abrasion tests	○	●	-	-	-
Computer microtomography	●	○	○	-	-
Electroanalytical methods	-	-	-	-	●
Spectral analysis	-	-	-	-	●
Chromatographic examinations	-	-	-	-	●
BREEDING METHODS					
Microbiological analysis	○	-	○	-	-

● - Basic method, ○ – Additional method, - Not applicable

Methods useful in field research. These methods include those for assessing the strength parameters of concrete and, above all, compressive strength based on measurements of forces pulling anchors that were previously concreted or put in drilled holes in concrete (*pull – out methods and torque tests*), and also pull-off adhesion (*the pull - off method*) based on the measurement of forces detaching metal discs from

Metody przydatne w badaniach polowych. Do metod tych zaliczyć można te umożliwiające ocenę parametrów wytrzymałościowych betonu, a przede wszystkim wytrzymałości na ściskanie na podstawie pomiarów sił wyrywających zabetonowanych uprzednio lub w nawierconych w betonie otworach kotew (metody *pull – out i torque tests*) oraz przyczepności na odrywanie (metoda *pull – off*) polega-

concrete substrates. These methods are described in [27, 28] and standardized in [27, 29]. The view of the newest set for performing tests using the pull-off method, according to [30], is shown in Figure 16.



Automated pull-off tester DY-216 by Proceq



Fig. 16. View of the newest set to perform pull-off tests [30]

Rys. 16. Widok najnowszego zestawu do wykonywania badań metodą pull – off [30]

Methods that are used in field tests also include those that allow concrete's resistance to chloride salt penetration and its water tightness to be assessed. *Penetration tests* and *water resistance tests* are used for this purpose. The penetration methods that are widely described in [31] and standardized in [32, 33] deserve special attention.

Methods listed in Figure 15 include those that are useful for assessing reinforcement corrosion in reinforced concrete structures (potentiometric, resistive and linear polarization). Linear polarization methods give reliable results by measuring the intensity of the corrosive current [34], however, direct contact with reinforcing steel is required. Methods of measuring the potential and resistance of concrete covers, including the modified method of four Wenner points [35], do not have this drawback.

In turn, methods that allow the composition and chemical parameters of concrete to be determined in field conditions based on the analysis of material specimens taken during on site tests include pH tests, rainbow tests and chloride tests.

Most kits for measuring the pH of concrete are based on the visual comparison of colours on litmus paper. However, modern pH evaluation kits include a measuring electrode, as shown, according to [36], in Figure 17.

jącej na pomiarze sił odrywających metalowe krążki od podłoża betonowych. Metody te są opisane w [27, 28] i znormalizowane [27, 29]. Widok najnowszego zestawu do wykonywania badania metodą *pull-off* przedstawiono na rys. 16, za [30].

Do metod wykorzystywanych w badaniach polowych zaliczają się również te które pozwalają ocenić odporność betonu na penetrację soli chlorkowych i jego wodoszczelność. Służą do tego *penetration tests* i *water resistance tests*. Wśród metod penetracyjnych na uwagę zasługują metody opisane szeroko w [31] i znormalizowane w [32, 33].

Spośród wymienionych na rysunku 15 metod niektóre są przydatne do oceny skorodowania zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych (potencjometryczna, rezystancyjna, polaryzacji liniowej). Metody polaryzacji liniowej dają wiarygodne wyniki poprzez pomiary natężenia prądu korozyjnego [34], ale wymagane jest w ich przypadku bezpośredni kontakt ze stalą zbrojeniową. Mankament ten niwelują metody pomiaru potencjału i rezystancji betonowej otuliny, w tym zmodyfikowana metoda czterech punktów Wennera [35].

Z kolei do metod pozwalających określać w warunkach polowych skład i parametry chemiczne betonu na podstawie analizy próbek materiału pobranych podczas badań na obiekcie zalicza się: *pH tests*, *rainbow tests* i *chloride tests*.

Większość zestawów do pomiaru pH betonu bazuje na wizualnym porównywaniu koloru na papierze lakmusowym. Są jednak dostępne nowoczesne zestawy do oceny pH z wykorzystaniem elektrody pomiarowej, jak przedstawiono to na rysunku 17, za [36]



Fig. 17. View of the newest set to assess the pH of concrete [36]

Rys. 17. Widok najnowszego zestawu do oceny pH betonu [36]

A simple method of assessing the degree of carbonation of concrete reinforcements in field conditions involves taking concrete and measuring the pH value with a pH meter.

In turn, the Rainbow test is used to assess the extent of the carbonation process of subsurface concrete layers. The measurements of the depth of carbonation of the thickness of the tested element is used e.g. in determining the remaining service life in a situation where the degree of corrosion is a critical factor, and also in monitoring the effectiveness of the process of realkalization of a concrete cover [9]. Figure 18 shows, according to [37], the view of the core bore taken from a concrete structure with the depth of carbonation of concrete marked using the *rainbow test*.

Prostym sposobem oceny stopnia skarbonatyzowania betonowych otulin prętów zbrojeniowych w warunkach polowych jest pobranie betonu i oznaczenie wielkości pH pehametrem.

Rainbow test z kolei służy do oceny zasięgu procesu karbonatyzacji przypowierzchniowych warstw betonu. Pomiary głębokości karbonatyzacji grubości badanego elementu ma zastosowanie na przykład w określeniu pozostałego czasu eksploatacji, w sytuacji gdy stopień korozji jest czynnikiem krytycznym, monitorowaniu efektywności procesu realkalizacji otuliny betonowej [9]. Na rysunku 18 przedstawiono za [37] widok odwiertu rdzeniowego pobranego z konstrukcji betonowej z zaznaczoną głębokością karbonatyzacji betonu ocenioną za pomocą *rainbow test*.



Fig. 18. A view of the core bore with marked carbonated concrete that was evaluated using the rainbow test, according to [37]

Rys. 18. Widok odwiertu rdzeniowego z zaznaczonym betonem skarbonatyzowanym ocenianym za pomocą rainbow test, za [37]

In turn, the *chloride test* method allows, in a simple way directly on an object, the content of chlorides, the depth of penetration and the profile of their distribution in the cross-section of a concrete element to be determined. The test method is described in [36].

In the summary of this section of the paper it is worth recommending literature [8], which comprehensively includes research on the corrosion of reinforcements and protective properties of concrete for the purpose of reinforced concrete construction diagnostics.

Z kolei metoda *chloride test* umożliwia w prosty sposób bezpośrednio na obiekcie określenie zawartości chlorków, głębokości penetracji oraz profil ich rozkładu w przekroju elementu betonowego. Sposób badania opisany został w [36].

W podsumowaniu tej części artykułu warto ponadto polecić pozycję literaturową [8], kompleksowo ujmując badania korozji zbrojenia i właściwości ochronnych betonu na użytek diagnostyki konstrukcji żelbetowych.

Methods used in a laboratory. These methods include the methods of direct evaluation of concrete strength in a structure. They are used in strength tests of concrete specimens that are taken from a structure. In this case, a strength machine is the testing device. These tests play a very important role in an *in situ* reliable assessment of the safety and reliability of structures.

It should be mentioned that the *in situ* assessment of concrete strength is included in standard [15]. Concrete compressive strength tests can be carried out directly on core specimens taken from a structure, or indirectly using non-destructive ultrasonic or sclerometric methods, as mentioned above. Detailed procedures for *in situ* testing of the compressive strength of concrete on core specimens, as well as the assessment of this strength in a structure based on the results of testing core specimens, are given in paper [13]. The procedure for testing the strength of concrete on core specimens includes [13]: taking concrete cores from a structure and preparing them for testing, determining the compressive strength of core specimens, analysis of the results of strength tests of these specimens, and also the development of a test report. In turn, the procedure of assessing the strength of concrete in a construction based on core specimens includes [13]: calculation of the mean value and standard deviation of the compressive strength of concrete in a structure, estimation of the uncertainty of the calculated mean value, and also the assessment of the characteristic compressive strength of concrete in a structure. Considering the fact of enriching these procedures with both the appropriate computational examples, as well as numerous explanatory comments, it is worth following papers [13 and 25] when diagnosing *in situ* concrete strength.

The direct assessment of reinforcing steel parameters usually involves the determination of yield strength, tensile strength, and also elongation. For this purpose, sections of structural bars from a reinforcement of a specific direction are taken from reinforced concrete structures from the least-stressed places. They are then tested, as is the case with concrete specimens, in a strength machine in a laboratory.

The most modern method that is used in a laboratory is X-ray computer microtomography, which enables a three-dimensional image of a concrete specimen taken from an examined structure to be reconstructed based on two-dimensional projections obtained during X-ray scanning. This method allows

Metody stosowane w laboratorium. Spośród tych metod powszechnie stosowane są metody bezpośredniej oceny wytrzymałości betonu w konstrukcji. Są one stosowane w badaniach wytrzymałości próbek betonu pobieranych z konstrukcji. Urządzeniem badawczym w tym przypadku jest maszyna wytrzymałościowa. Badania te pełnią bardzo istotną rolę w wiarygodnej ocenie bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji *in situ*.

Należy dodać, że ocena wytrzymałości betonu *in situ* jest przedmiotem normy [15]. Badania wytrzymałości betonu na ściskanie mogą być realizowane bezpośrednio na próbkach rdzeniowych pobranych z konstrukcji albo pośrednio z wykorzystaniem metod nieniszczących ultradźwiękowej lub sklerometrycznej o czym już wcześniej wspomniano. Szczegółowe procedury badania wytrzymałości betonu na ściskanie *in situ* na próbkach rdzeniowych oraz oceny tej wytrzymałości w konstrukcji na podstawie wyniku badania próbek rdzeniowych zostały podane w pracy [13]. Procedura badania wytrzymałości betonu na próbkach rdzeniowych obejmuje [13]: pobieranie rdzeni betonowych z konstrukcji i ich przygotowanie do badań, oznaczenie wytrzymałości na ściskanie próbek rdzeniowych, opracowanie zestawienia wyników badań wytrzymałości tych próbek wraz z opracowaniem raportu z badań. Z kolei procedura oceny wytrzymałości betonu w konstrukcji na próbkach rdzeniowych obejmuje m.in. [13]: obliczanie wartości średniej i odchylenia standardowego wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcji, oszacowanie niepewności obliczonej wartości średniej, ocenę charakterystycznej wytrzymałości na ściskanie betonu w konstrukcji. Biorąc pod uwagę zarówno fakt wzbogacenia tych procedur stosownymi przykładami obliczeniowymi, jak również liczne objaśniające ją komentarze, warto na użytek diagnostyki wytrzymałości betonu w konstrukcji *in situ* wzorować się na pracach [13 i 25].

Jeżeli chodzi zaś o bezpośrednią ocenę parametrów stali zbrojeniowej, to obejmują one zazwyczaj określenie granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie, wydłużalności, i w tym celu pobierane są z konstrukcji żelbetowych z miejsc najmniej wyciężonych odcinki prętów konstrukcyjnych danego kierunku zbrojenia, które podobnie jak pobierane z konstrukcji próbki betonowe badane są następnie w laboratorium w maszynie wytrzymałościowej.

Spośród metod stosowanych w laboratorium najnowocześniejsza jest rentgenowska mikrotomografia komputerowa, pozwalająca na rekonstrukcję trójwymiarowego obrazu próbki betonu pobranej z badanej konstrukcji, na podstawie dwuwymiarowych projekcji

many parameters that characterize the structure of concrete, including its porosity, the distribution of pores with regards to their size, the distribution of aggregate grains, the distribution of microdamage, the distribution of scattered reinforcement, the level of carbonatisation of concrete and elastic modulus values, to be determined [38]. The results obtained using this method can be very useful, e.g. for the interpretation of the causes of structural damage. Figure 19 illustrates the apparatus that is used in this research method [9]

uzyskanych w trakcie jej skanowania wiązką promieni rentgenowskich. Metoda ta daje możliwość określenia wielu parametrów charakteryzujących strukturę betonu, m.in. porowatości, rozkładu porów pod względem wielkości, rozmieszczenia ziaren kruszywa, rozmieszczenia mikrouszkodzeń, rozmieszczenia zbrojenia rozproszonego, stropnia skarbonatyzowania betonu, i również określenia wartości modułu sprężystości [38]. Rezultaty badań uzyskane tą metodą mogą być bardzo przydatne na przykład w interpretacji przyczyn powstania uszkodzeń konstrukcji. Rysunek 19 ilustruje aparaturę stosowaną w tej metodzie badawczej [9]



Fig.19. A stand for an x-ray examination with computer microtomography and an example of a concrete cross-section, according to [42]

Rys.19. Stanowisko do badań rentgenowską mikrotomografią komputerową oraz przykładowy przekrój betonu, za [42]

3.3. Test loads of a structure

One of the methods that leads to a reliable assessment of the safety and reliability of reinforced concrete structure elements are test loads that are used in justified cases. When signalling this problem, it should be noted that they are performed, e.g. when there is a need to ascertain the current limit state of the load-bearing capacity or the limit state of the serviceability of a structural element, which cannot be reliably carried out when conducting research or calculations. The reason for this may be, e.g. a fire that had an impact on an object in the past. Test loads are usually non-destructive and can be carried out in field conditions or in a laboratory.

According to [7, 39], due to the objectives and methods of conducting research, test loads have to, among others, show whether elements or constructions were made correctly and behave in accordance with the design assumptions, assess the possibility of transferring loads by the tested structural element or other structural elements cooperating with it, evaluate the behaviour of the entire structure, and also check the behaviour of a structure under design loads. However, load-bearing capacities are determined on the basis of deformation measurements.

3.3. Obciążenia próbne konstrukcji

Jedną z dróg lub inaczej mówiąc metod albo sposobów prowadzących do wiarygodnej oceny bezpieczeństwa i niezawodności elementów konstrukcji żelbetowych są stosowane w przypadkach uzasadnionych obciążenia próbne. Sygnalizując ten problem należy zauważyć, że wykonuje się je na przykład w sytuacji, gdy zachodzi potrzeba upewnienia się co do aktualnego stanu granicznego nośności albo stanu granicznego użyteczności elementu konstrukcyjnego, a nie można tego z różnych przyczyn dokonać wiarygodnie na drodze badawczej i obliczeniowej. Przyczyną tego może być na przykład pożar, któremu obiekt uległ w przeszłości. Zazwyczaj obciążenia próbne mają charakter nieniszczący i mogą być realizowane w warunkach polowych lub w laboratorium.

Według [7, 39], ze względu na cele i sposoby prowadzenia badań, obciążenia próbne mają m.in. za zadanie wykazać, czy elementy lub konstrukcje wykonane zostały prawidłowo i zachowują się zgodnie z założeniami projektów, sprawdzenia zachowania się konstrukcji pod obciążeniami projektowymi z tym, że nośności określone są na podstawie pomiaru odkształceń, oceny możliwości przenoszenia obciążeń przez testowany element konstrukcyjny lub

During the conducted test loads, the object of measurements may be the deflection of the tested reinforced concrete element, crack width, or the development of destructive processes in concrete and at the interface of concrete and reinforcing bars caused by a growing test load. Depending on the object of measurements, an appropriate research method (apparatus) should be chosen in order to ensure such measurements. For example, the acoustic emission method is used to “track” the development of the above-mentioned destructive processes [20 – 23].

In conclusion, it should be said that when planning the test loads of a reinforced concrete element, one should rely largely on their own engineering knowledge, because there are no detailed guidelines for determining the value of these loads. Some practical tips on this issue can be found in papers [4, 7, 39, 40, 41]. The rule, however, is that the loads should be preceded by a detailed diagnosis of an element or structure, among others, regarding: the determination of material characteristics of concrete, reinforcing steel and a concrete cover; the specification of real geometrical dimensions; the identification of supporting conditions, connections, etc.

4. SUMMARY

The subject matter presented in the paper that concerns the principles of performing expertise and testing reinforced concrete constructions is, in the opinion of the authors, seen as crucial regarding the efforts to ensure an appropriate safety, reliability and durability of these constructions. The continuation of this idea is this paper, which has been prepared especially for those who have not yet prepared expert opinions on reinforced concrete structures, or have relatively little experience in this topic.

Therefore, in the introductory part, the situations that justify the need to prepare expert opinions were approximated and highlighted. Afterwards, the usual layout and content of expert opinions was given and commented on. Much attention was devoted in the paper to diagnostic procedures, which are very important, necessary and required in order to correctly prepare an expert report. The general rules to be followed in this matter were specified, the available diagnostic methods and techniques were reviewed, and the suggestion of various classifications of these methods were also provided in order to facilitate the selection of a specific method for certain diagnostic

też przez inne współpracujące z nimi elementy konstrukcyjne, oceny zachowania się całej konstrukcji.

W trakcie realizowanych obciążeń próbnych przedmiotem pomiarów może być ugięcie badanego elementu żelbetowego, szerokość rozwarcia rys lub też rozwój procesów destrukcyjnych w betonie i na styku betonu z prętami zbrojeniowymi powodowany narastającym obciążeniem próbnym. W zależności od przedmiotu pomiaru należy dobrać odpowiednią metodę badawczą (aparaturę), zapewniającą taki pomiar. Przykładowo do „śledzenia” rozwoju ww. procesów destrukcyjnych przydatna jest metoda emisji akustycznej [20 – 23].

W podsumowaniu należy stwierdzić, że planując obciążenia próbne elementu konstrukcyjnego żelbetowego, należy w dużej mierze polegać na własnej wiedzy inżynierskiej, gdyż brak jest szczegółowych wytycznych dotyczących ustalania wartości tych obciążeń. Pewne praktyczne wskazówki w tej kwestii można znaleźć w pracach [4, 7, 39, 40, 41]. Zasadą jest jednak to, że obciążenia powinny być poprzedzone szczegółową diagnostyką elementu lub konstrukcji, m. in. w zakresie określenia charakterystyk materiałowych betonu i stali zbrojeniowej, otulenia zbrojenia betonem, ustalenia rzeczywistych wymiarów geometrycznych, rozpoznania warunków podparcia, połączenia itd.

4. PODSUMOWANIE

Przedstawiona w referacie tematyka, dotycząca zasad wykonywania ekspertyz i badań konstrukcji żelbetowych, kwalifikuje się zdaniem autorów do kluczowych w rozumieniu starań o zapewnienie należytego bezpieczeństwa, niezawodności i trwałości tych konstrukcji. Kontynuacją tej myśli jest niniejszy referat przygotowany przede wszystkim z myślą o tych, którzy do tej pory jeszcze nie sporządzali ekspertyz konstrukcji żelbetowych lub posiadają w tym temacie stosunkowo niewielkie doświadczenie. Dlatego w części wstępnej przybliżono i naświetlono sytuacje uzasadniające potrzebę sporządzania opracowań o charakterze ekspertyzowym. Następnie podano i skomentowano zwyczajowo przyjmowany układ i treści ekspertyz. Dużo uwagi poświęcono w referacie postępowaniu diagnostycznemu, które jest bardzo ważne, niezbędne i konieczne do należytego sporządzenia opracowania ekspertyzowego, przydatnego do celu, któremu ma służyć. Sprecyzowano w tej kwestii ogólne zasady, których należy przestrzegać, dokonano przeglądu dostępnych metod i technik diagnostycznych wraz z zaproponowaniem różnorodnych ich klasyfikacji w celu ułatwienia doboru konkretnych metod do konkretnych

needs. In addition, the most important literature was presented, including book publications [1-4, 6-8, 12, 13, 25] that are extremely useful in the discussed topic and which therefore deserve special attention.

potrzeb diagnostycznych. Ponadto przedstawiono najważniejszą literaturę, wśród której zwracają uwagę opracowania książkowe [1-4, 6-8, 12, 13, 25], niezwykle przydatne w rozpatrywanym temacie.

REFERENCES

- [1] Czarniecki L., Łukowski P., Garbacz A.: *Repair and protection of concrete structures. Commentary to PN-EN 1504*. Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warsaw 2017
- [2] Bień. J.: *Damage and diagnostics of bridge structures*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warsaw 2010.
- [3] Czarniecki L., Emmons P.H.: *Repair and protection of concrete structures*. Polish Cement, Cracow 2002.
- [4] Runkiewicz L.: *Strengthening of reinforced concrete structures*. Guide. Building Research Institute, Warsaw 2016.
- [5] Act from July 7, 1994. Construction law (Journal of Laws No. 89 from 1994, as amended).
- [6] Czaplński K.: *The method and form of preparing construction expertise reports*. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, wrocław 2012.
- [7] Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A.: *Diagnostics of reinforced concrete structures*. Volume 1, wydawnictwo Naukowe Pw N, warsaw 2010.
- [8] Zybura A., Jaśniok M., Jaśniok T.: *Diagnostics of reinforced concrete structures*. Volume 2. Tests of reinforcement corrosion and the protective properties of concrete. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warsaw 2017.
- [9] Hoła J., Bień J., Sadowski Ł., Schabowicz K.: *Non – destruktywne i semi – destruktywne diagnostyki betonowych konstrukcji w ocenie ich trwałości*. Bulletin of the Polish Academy of Science. Technical Sciences, 2015 vol 63, 1, 87 – 96.
- [10] Runkiewicz L.: *Tests of reinforced concrete structures*. Gamma Office, Warsaw 2002.
- [11] Hoła J., Schabowicz K.: *Diagnostics of building objects*. Building Materials, 2015, 5, pp. 3 - 7.
- [12] Brunarski L., Runkiewicz L.: ITB instruction No. 209. *Instructions of using the ultrasonic method for non-destructive quality control of concrete in constructions*. Building Research Institute, Warsaw 1997.
- [13] Brunarski L., Dohojda M.: *Diagnostics of concrete strength in constructions*. Building Research Institute, Warsaw 2015.
- [14] PN-EN 12504-4:2005. Concrete testing. Part 4. Determination of ultrasonic wave velocity.
- [15] PN-EN 13791:2008. The assessment of compressive concrete strength in constructions and prefabricated concrete products.
- [16] Hoła J., Stawiski B.: *Research on the suitability of the ultrasonic method for quick assessment of the quality of concrete structures*. Non-destructive Test Notebooks. 32 National Non-Destructive Test Conference. Międzyzdroje 2003, pp. 111 - 114.
- [17] Sansalone M., Streett W.: *Impact – echo. Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonary*. Bullbrier Press, Ithaca 1997.
- [18] Hoła J., Schabowicz K.: *State – of – the – art. Nondestructive methods for diagnostic testing of building structures – anticipated development trends*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2010, Vol. 10, 3, 5 – 18.
- [19] Schabowicz K., Suvorov V.: *Nondestructive testing and constructing profiles of back walls by means of ultrasonic tomography*, Russian Journal of Nondestructive Testing, 50 (2) 2014, Vol. 50, 2, 109 – 119.
- [20] Hoła J.: *Acoustic emission, sources, methods, applications*. Warsaw. Polish Academy of Sciences, Institute of Fundamental Problems of Technology, Pascal Office, 1994.
- [21] Świt G.: *The acoustic emission method in the analysis of damage of prestressed concrete structures*. Monograph. Kielce University of Technology, Kielce, 2008.
- [22] Goszczyńska B., Świt G., Trąmpczyński W., Krampikowska A.: *Experimental validation of concrete crack identification and location with acoustic emission method*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2012, 12, 23 – 28.
- [23] Goszczyńska B., Świt G., Trąmpczyński W., et al: *The application of the acoustic emission method to analyze the scratch process of reinforced concrete beams*. Scientific Papers of Rzeszów University of Technology: Building and Environmental Engineering, Notebook 59, 2012, pp. 76-84.
- [24] Conyers L., Goodman D.: *Ground – penetrating radar*. AltraMira Press, 1997.
- [25] Runkiewicz L., Sieczkowski J.: *The assessment of concrete strength in constructions based on sclerometer tests*. Guide. Building Research Institute, Warsaw 2018.
- [26] PN-EN 12504-2:2013-03. *Concrete tests in structures*. Part 2. Non-destructive testing. Determination of the number of reflections.
- [27] PN-EN 12504-3:2006. *Concrete tests in structures*. Part 3. Determination of the tearing force.
- [28] Malhotra V. M., Carino N. J.: *Handbook on nondestructive testing of concrete*. CRC Press, 2004.

- [29] ASTM C 900-82: Standard Method for Pullout Strength of Haedened Concrete, ASTM Committee on Standards, 1916 Race Street, Philadelphia, Pa. 19103, USA.
- [30] Sadowski Ł., Żak A., Hoła J.: *Multi-sensor evaluation of the concrete within the interlayer bond with regard to pull-off adhesion*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2018, 18(2), 573-582.
- [31] Verbeck G.J.: *Field and laboratory studies of the sulphate resistance of concrete*. Portland Cement Association. Research and Development Laboratories, 1967.
- [32] ASTM C1202. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, 2010.
- [33] ASTM C 803 „Penetration resistance of Hardened Concrete”.
- [34] Monteiro J. M., Morrison F., Frangos W.: *Nondestructive measurement of corrosion state reinforcing steel in concreto*. ACI materials Journal, Vol. 99, 6.
- [35] Sadowski Ł.: *Methodology for assessing the probability of corrosion in concrete structures on the basis of half-cell potential and concrete resistivity measurements*. The Scientific World Journal, 2013.
- [36] Materials from www.agriculturesolutions.com.
- [37] Jasieńko J., Moczko M., Moczko A., Dżugaj R.: *Examination of the mechanical and physical characteristics of concrete in the lower perimeter ring of the dome of the Centennial Hall in Wrocław*. Conservation News, 2010, 21 - 34.
- [38] Czarniecki L., Woyciechowski P.: *Prediction of the reinforced concrete structure durability under the risk of carbonation and chloride aggression*. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Siences, 2013, 61, 1, 173 – 181.
- [39] Lewicki B.: *Test loads of the constructions of existing buildings*. Scientific Works of the Building Research Institute, w arsaaw 1997.
- [40] Lewicki B.: *An assessment based on the test loads of an existing structure for the intended use*. Materials of the 21 National Conference “Workshop of the Designer”, volume 2. Szczyrk 2006, 203 - 2015.
- [41] Masłowska E., Spizewska D.: *Strengthening of construction structures*. Arkady, w arsaaw 2000.
- [42] Stefaniuk D., Sadowski Ł., *The use of X-ray computer microtomography to assess selected features of the microstructure of concrete*, National Conference on Radiographic Research - “POPÓW 2016”

Acknowledgments:

The work was financed by Wrocław University of Technology.

Podziękowania

Praca była finansowana przez Politechnikę Wrocławską.