



Badania techniczne historycznych ruin

Bogusław Szmygin
Maciej Trochonowicz
Beata Klimek
Bartosz Szostak

Lublin 2018

Badania techniczne historycznych ruin

Monografie – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska
Wydział Budownictwa i Architektury
ul. Nadbystrzycka 40
20-618 Lublin

Bogusław Szmygin, Maciej Trochonowicz
Beata Klimek, Bartosz Szostak

Badania techniczne historycznych ruin



Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej
Lublin 2018

Recenzenci:

Prof. nadzw. dr hab. inż. arch. Grzegorz Bukal

Prof. nadzw. dr hab. inż. arch. Cezary Głuszek

Monografia powstała przy udziale:

Katarzyna Drobek, Karol Krupa, Lucjan Gazda

Zdjęcie i projekt okładki: Katarzyna Pełka-Smętek

Skład i łamanie: Katarzyna Pełka-Smętek

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2018

ISBN: 978-83-7947-344-1

Wydawca: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej

www.biblioteka.pollub.pl/wydawnictwa

ul. Nadbystrzycka 36C, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59

Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak

www.agencjapop.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Nakład: 50 egz.

Spis treści

1. Wstęp	7
2. Pomiary inwentaryzacyjne	9
2.1. Tradycyjne techniki pomiarowe	12
2.2. Metoda geodezyjna.....	15
2.3. Dokumentacja fotograficzna (tradycyjna, sferyczna, przy użyciu drona) ...	16
2.4. Fotogrametria.....	18
2.5. Skanowanie 3D	20
3. Badania <i>in situ</i> materiałów i elementów konstrukcji	24
3.1. Badania podłoża gruntowego	24
3.1.1. Stopień skomplikowania warunków gruntowo-wodnych i kategoria geotechniczna	25
3.1.2. Etapy dokumentowania geologiczno-inżynierskiego	26
3.1.3. Warunki geologiczno-inżynierskie i ich zmienność regionalna	27
3.1.4. Woda w środowisku gruntowym.....	28
3.1.5. Procesy geodynamiczne kształtujące warunki geologiczno-inżynierskie.....	29
3.1.6. Metody badań geotechnicznych	31
3.1.7. Geoinżynieria w utrzymaniu obiektów zabytkowych.....	33
3.2. Badania elementów konstrukcji.....	34
3.2.1. Badanie endoskopowe.....	35
3.2.2. Badanie ultradźwiękowe	36
3.2.3. Badanie młoteczkowe.....	36
3.2.4. Badanie elektromagnetyczne	37
3.2.5. Badanie sklerometryczne.....	38
3.2.6. Badanie wytrzymałości na odrywanie (PULL-OFF)	39
3.2.7. Badanie termowizyjne.....	42
3.2.8. Badanie poduszkami ciśnieniowymi	44
3.2.9. Analizy komputerowe	46
3.3. Badania wilgotności metodami pośrednimi	47
3.3.1. Metoda pojemnościowa – dielektryczna	48
3.3.2. Metoda opornościowa.....	50

3.3.3. Metoda mikrofalowa	51
3.3.4. Metoda chemiczna.....	52
3.4. Badania makroskopowe – „odkrywki”	53
3.4.1. Odkrywki konstrukcyjne.....	53
3.5. Badania zniszczeń spowodowanych korozją biologiczną	57
4. Badania laboratoryjne materiałów	67
4.1. Badania cech mechanicznych materiałów.....	67
4.2. Badania cech fizycznych materiałów.....	70
4.2.1. Badanie wytrzymałości na ściskanie	70
4.2.2. Badanie wytrzymałości na zginanie.....	73
4.2.3. Oznaczanie nasiąkliwości przy ciśnieniu atmosferycznym	74
4.2.4. Oznaczenie współczynnika nasiąkliwości kapilarnej	76
4.2.5. Oznaczenie odporności na zamarzanie	79
4.2.6. Odporność na krystalizację soli.....	80
4.3. Badanie wilgotności elementów konstrukcji	81
4.4. Badania zasolenia elementów konstrukcji	86
5. Badania historycznych tynków i warstw malarskich.....	93
5.1. Badania laboratoryjne zapraw.....	93
5.1.1. Badanie makroskopowe.....	95
5.1.2. Badanie mikroskopem optycznym.....	95
5.1.3. Badanie mikroskopem elektronowym (SEM) i analizy (SEM-EDS)....	100
5.1.4. Badanie derywatograficzne- termiczna analiza różnicowa (DTA)..	102
5.1.5. Badanie dyfraktometryczne (XRD)	102
5.2. Badania laboratoryjne warstw malarskich	104
5.2.1. Badanie mikroskopem optycznym.....	104
5.2.2. Badanie mikroskopem elektronowym (SEM)	105
5.2.3. Badanie związków organicznych: pigmentów, barwinków, spoiw – analiza Fouriera (FTIR).....	106
5.2.4. Badanie spektrometryczne – Fluorescencja rentgenowska (XRF)....	108
6. Bibliografia	109

1. Wstęp

Ocena stanu technicznego obiektów zabytkowych jest jednym z najważniejszych problemów konserwatorskich, jest bowiem podstawą zasadniczych decyzji związanych z ochroną zabytku – od określenia zakresu potrzebnych ingerencji w formę i substancję zabytku, poprzez zaplanowane prace konserwatorskich i remontowych, aż do wybrania formy adaptacji obiektu do współczesnych funkcji użytkowych. W każdym z tych obszarów ocena stanu technicznego nie jest czynnikiem jedynym, ale ważnym, a często nawet decydującym. W przypadku zabytków budownictwa i architektury ocena stanu technicznego jest uwarunkowana na dwóch poziomach. Pierwszym uwarunkowaniem są problemy związane ze stanem zabytków jako budowli. Są to kwestie stricte techniczne – geotechniczne, konstrukcyjne, materiałowe, technologiczne, itp. W przypadku tych inżynierskich problemów obiekt zabytkowy traktowany jest podobnie jak każda inna budowla. Ważne są parametry określające stan materiałów budowlanych i konstrukcji, np. wytrzymałość, wilgotność, zasolenie, przyczepność, izolacyjność, czy też np. spękanie, wychylenie, ugięcie, osiadanie. Jednak ocena stanu technicznego historycznych budowli nie może być sprowadzona tylko do zagadnień inżynierskich. Konieczność zachowania obiektu zgodnie z wymaganiami autentyczności i integralności – czyli nadrzędnych zasad konserwatorskich – często wpływa na zakres oceny technicznej.

Badania techniczne obiektów zabytkowych często są bardziej rozbudowane i dokładniejsze, wynika to z przyjęcia określonych technologii czy materiałów konserwatorskich, które mogą wymagać analizy in situ oraz w laboratorium. Dodatkowe uwarunkowania wynikające z konieczności wykonania prac konserwatorskich (oprócz budowlano-remontowych) oraz specjalna wartość obiektów zabytkowych sprawiają że ocena ich stanu technicznego jest zadaniem ważnym, odpowiedzialnym i często nieoczywistym. Dlatego też tworzenie specyficznych standardów dla takich analiz jest w pełni uzasadnione. Szczególnie w odniesieniu do nietypowych grup zabytków, takich jak zabytkowe ruiny.

W Katedrze Konserwacji Zabytków na Wydziale Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej od kilkunastu lat prowadzone są prace mające na celu standaryzację dokumentacji, oceny wartości i oceny stanu technicznego zabytkowych obiektów. Przede wszystkim opracowywane są tzw. Karty Oceny Technicznej Zabytku (rozbudowane formularze w postaci tabelarycznej), które pozwalają całościowo zestawić informacje istotne dla udokumentowania i oceny stanu technicznego zabytkowego obiektu. Odmienność różnych grup typologicznych zabytków sprawia, że niecelowe jest opracowanie Karty uniwersalnej. Dlatego też sukcesywnie opracowywane są Karty dla wybranych grup zabytków. Do tej pory powstały Karty dla dworów i kamienic, obiektów drewnianych oraz historycznych ruin. Doświadczenia w analizie różnych zabytków dokonywane przy użyciu Kart Oceny pokazały, że zasadne jest również całościowe przedstawienie badań, które służą tym ocenom. Poradnik zatytułowany *Badania Techniczne Historycznych Ruin* zawiera zestawieniem badań i aparatury, które są potrzebne by dokonać kompleksowej oceny stanu technicznego tego typu zabytków. Jest to zatem publikacja uzupełniająca standard

oceny technicznej historycznych ruin. Wraz z Kartą Oceny ma służyć przede wszystkim zarządom tej grupy zabytków.

Publikacja *Badania Techniczne Historycznych Ruin* składa się z 4 zasadniczych części. Podstawą ich wydzielenia była charakterystyka przedstawionych w nich badań. Część pierwsza dotyczy pomiarów inwentaryzacyjnych. Jest to część ważna, gdyż inwentaryzacja zabytku ma podwójne znaczenie. Po pierwsze inwentaryzacja dokumentuje aktualną formę ruiny, która wobec trwającego procesu zniszczenia, cały czas zmienia się. Jest to więc utrwalenie stanu, który już nie będzie istniał. Po drugie inwentaryzacja jest podstawą wszelkiej dokumentacji konserwatorskiej, projektowej, remontowej. W części tej przedstawiono najczęściej stosowane techniki pomiaru i dokumentacji – tradycyjne metody pomiaru, metody geodezyjne, fotograficzne, fotogrametrię, skanowanie laserowe, fotografie wykonywaną z dronów.

W części drugiej przedstawiono badania *in situ* materiałów i konstrukcji obiektu w ruinie. Oprócz badań podłoża gruntowego w dwóch podrozdziałach omówiono badania cech fizycznych konstrukcji oraz badania zawilgocenia. Badanie cech fizycznych elementów konstrukcji służy bezpośrednio ocenie ich stanu technicznego. Z kolei badania wilgotności, które zasadniczo służą ocenie stanu materiału budowlanego, pozwalają też ustalić przyczyny zawilgocenia całej budowli. Wymaga to jednak opracowania map zawilgocenia obiektu, a więc wielu pomiarów, które można wykonać kilkoma metodami. W tej części przedstawiono też metody badania zniszczeń powodowanych korozją biologiczną, ważnego czynnika w procesie destrukcji ruin.

Część trzecia również dotyczy badań materiałów i konstrukcji, które są prowadzone w laboratorium. Badania te dotyczą przede wszystkim cech fizycznych materiałów, z których zbudowano zrujnowany obiekt oraz zapraw, które łączyły bloki kamienne lub cegły. W części tej również przedstawiono metody badania stopnia zasolenia elementów ruin.

Część czwarta jest poświęcona badaniom tynków i warstw malarskich. W obiektach w ruinie ze względu na ich wiek i brak zabezpieczeń tynków i warstw malarskich nie jest wiele. Tym jednak większą mają one wartość, i tym ważniejsze jest ich odpowiednie zabezpieczenie.

Większość badań przedstawionych w publikacji została opisana według podobnego schematu. Obejmuje on przedstawienie istoty badania, sposobu jego wykonania oraz formy przedstawienia wyników. Całościowy charakter publikacji sprawia, że prezentacja badań jest syntetyczna, dlatego też została ona uzupełniona bibliografią.

Na koniec trzeba też dodać, że przedstawione w pracy badania techniczne powinny być skoordynowane z badaniami historycznymi, archeologicznymi i architektonicznymi. Dopiero cały zespół tych badań tworzy obraz obiektu i pozwala określić jego wartości. I dopiero na tej podstawie można odpowiedzialnie zaplanować prace konserwatorskie oraz program współczesnego zagospodarowania historycznej ruiny.

2. Pomiary inwentaryzacyjne

Inwentaryzacja pomiarowo-rysunkowa jest najbardziej popularną, a zarazem podstawową formą dokumentacji zabytków. Z racji braku precyzyjnych danych o obiektach uznawanych za ruiny, konieczne jest stworzenie dokładnej ich inwentaryzacji. Istnieje potrzeba wykonania opracowania, które uwzględniłoby ich specyfikę oraz stan zachowania. Wykonywanie dokumentacji pomiarowej poprzedza działania, które wiążą się z ochroną zabytków, różnego rodzaju badania oraz wykonywane projekty. Jest to również niezwykle ważne ze względu na możliwość monitorowania obiektu. Dokładna dokumentacja oraz zinwentaryzowanie obiektów jest podstawą do jakichkolwiek działań konserwatorskich.

Inwentaryzacja polega głównie na wykonaniu rysunków pomiarowych, a także opisu aktualnego stanu obiektu bądź też jego części. Jej celem jest dokładne poznanie zabytku. Niezależnie od przyjętej metody inwentaryzowania obiektu, rozpoczynana jest od przeprowadzenia wizji w terenie, dopiero po dokładnym wywiadzie przechodzi się do inwentaryzacji pomiarowej. Opracowanie to musi być sporządzone w sposób dokładny, powinno uwzględniać wszystkie widoczne deformacje, przekształcenia, zarysowania, spękania oraz niekiedy przekształcenia obiektu na przestrzeni czasu, a także widoczne detale. Jej zadaniem jest dokładne odwzorowanie rzeczywistego układu przestrzennego oraz określenie struktury technicznej i funkcjonalnej obiektów lub ich części. W oparciu o różne pomiary opracowuje się dokumentację architektoniczną tychże obiektów.

Inwentaryzacja stanowi materiał wyjściowy do wykonania jakichkolwiek prac na obiekcie, dzięki niej możliwe jest przeprowadzenie wszelkich badań oraz analiz ruin. Inwentaryzacja pełni funkcję zarejestrowania stanu obiektu w danym czasie. Pomiary inwentaryzacyjne są podstawą do opracowania projektu budowlanego oraz wykonawczego, a także w późniejszym czasie do kalkulacji prac budowlano-konserwatorskich. Efekty prac inwentaryzacyjnych przedstawiane są w formie opisowej, graficznej oraz fotograficznej.

Inwentaryzacja wymagana jest między innymi przy:

- rozbudowie obiektu,
- nadbudowie obiektu,
- remoncie budynku,
- rozbiórce obiektu zabytkowego,
- ocenie stanu technicznego.

Skala rysunków

Inwentaryzacja obiektów powinna być wykonana w odpowiedniej skali, zazwyczaj przy budynkach murowanych 1:50. Zakres inwentaryzacji nie jest jasno określony i w dużej mierze zależy od celu, w jakim jest sporządzana. Jeżeli rysunki mają być załączone jedynie do kart, to powinny być schematyczne i uwzględniające jedynie podstawowe wymiary. Te opracowania mogą być wykonane nawet w skali 1:100, ze względu na mały stopień dokładności. Natomiast dokumentacja pomiarowo-rysunkowa robiona

na potrzeby badawcze i konserwatorskie powinna być dużo bardziej precyzyjnie przygotowana. Zastosowanie skali 1:50 skutkuje większą dokładnością wykonywanego rysunku. Zarówno przekroje jak i elewacje powinny być szczegółowe, co jest utrudnione podczas stosowania skali 1:100. Detale należy wykonywać w takiej skali, by móc dokładnie pokazać wszystkie elementy wchodzące w jego skład przy zachowaniu dużej czytelności rysunku, dlatego odpowiednia skala to 1:1, 1:10 ewentualnie 1:20. Stwierdza się więc, że im bardziej rozbudowany cel badawczy, tym dokumentacja powinna być dokładniejsza.

Zakres inwentaryzacji

Należy także pamiętać, że integralną częścią dokumentacji pomiarowo-rysunkowej jest część opisowa, na którą składa się opis metod pomiarowych oraz charakterystyka obiektu. Konieczne jest także wykonanie dokumentacji fotograficznej.

W zakres wymaganej dokumentacji inwentaryzacyjnej może wchodzić:

- rysunek sytuacyjny,
- rzuty wszystkich kondygnacji,
- przekroje pionowe,
- rysunki elewacji,
- rysunki detali zabytkowych,
- dokumentacja fotograficzna,
- opis techniczny uwzględniający lokalizację obiektu oraz jego rodzaj i charakter, liczbę kondygnacji, wysokość budynku oraz jego powierzchnię,
- opis materiałów z jakich wykonano poszczególne elementy budynku.

W zależności od późniejszego przeznaczenia inwentaryzacji, w zupełnie inny sposób będzie przedstawiała się także sprawa jej wykonywania. Ze względu na to, że obiekty w ruinie są tak bardzo różnorodne to nie jest możliwe jednoznaczne stwierdzenie ilości koniecznych do wykonania rysunków. Zazwyczaj układ przestrzenny obiektu wymaga wykonania kilku przekrojów pionowych. Rysunki muszą uwzględniać wszystkie detale zabytkowe, które powinny być oznaczone zarówno na rzutach jak i na dokładniejszych rysunkach w odpowiednio większej skali.

Normy i wytyczne techniczne obowiązujące w zakresie inwentaryzacji

Jeżeli chodzi o przepisy dotyczące wykonywania inwentaryzacji, jest wiele norm odnoszących się do sporządzania rysunków budowlanych oraz dotyczących obmiaru powierzchni pomieszczeń, jednak nie zostaną one omówione ze względu na ich dużą szczegółowość. Z racji tego, iż obiekty w ruinie są obiektami nietypowymi, nie do końca możliwe jest jednoczesne stosowanie wszystkich obowiązujących norm. Normy te w przypadku ruin nie znajdują aż tak wielkiego zastosowania, ze względu na ich specyfikę.

Obiekty w ruinie są na tyle unikalne, że nie jesteśmy w stanie chociażby odnieść się do poziomu pobierania obmiaru. Płaszczyzna cięcia poziomego zostanie wyznaczona na podstawie przeanalizowania obiektu i wybrania najbardziej indywidualnych cech. Może być tak, że obmiar wykonany na poziomie 1 m nie sprawdzi się, ponieważ nie bę-

dzie żadnych ważnych elementów czy otworów. Wtedy będzie konieczne wykonanie go na innym, być może sporo wyższym poziomie.

Co do stosowania norm, to tak naprawdę wszystko zależy od specyfiki budowli oraz jej stanu zachowania. Normy występują jedynie jako wytyczne do opracowywania, jednak nie jest możliwe wykorzystanie ich w każdej sytuacji. Określają one jedynie pewne standardy. Dlatego też w wielu przypadkach konieczne będą odstępstwa od nich.

Problematyka inwentaryzacji rysunkowo-pomiarowych

Zazwyczaj podczas tworzenia inwentaryzacji pojawia się też wiele problemów. Głównym i najbardziej problematycznym zagadnieniem pojawiającym się przy wykonywaniu inwentaryzacji jest brak jej standaryzacji. Nieprawidłowe rozpoznanie obiektu, niedobra metoda pomiaru czy też nieodpowiednie przedstawienie rysunkowe powodują wiele błędów i niedociągnięć.

Zasadniczym problemem pomiaru ręcznego jest przebieg procesu mierzenia, ponieważ zbierane pomiary nie do końca mogą odzwierciedlić rzeczywistą strukturę. Powodem tego jest nieuwzględnianie poziomów porównawczych, przekątnych oraz poligonów. Skutkuje to schematycznym podejściem do rysunków bez uwzględnienia zniekształceń. Źle sporządzony rzut spowoduje błędy w kolejnych rysunkach. Dokumentacja opatrzona więc będzie licznymi błędami i przekłamanymi wymiarami. Nieprawne jest także interpolowanie wymiarów.

Częstym błędem jaki jest popełniany przy opracowywaniu dokumentacji pomiarowo-rysunkowej obiektu jest niedostosowanie się do norm, przede wszystkim tych, które określają oznaczenia graficzne występujące na rysunkach architektoniczno-budowlanych. W wielu przypadkach zapomina się również o tym, że część tekstowa i dokumentacja fotograficzna jest integralną częścią dokumentacji rysunkowej.

Większość błędów jakie występują w trakcie tworzenia inwentaryzacji wynikają w dużej mierze z faktu, iż brakuje jakichkolwiek regulacji w kwestii wykonywania dokumentacji inwentaryzacyjnej. Zupełnie przeciwnie niż w przypadku tworzenia dokumentacji projektowej, badań konserwatorsko-restauratorskich, badań architektoniczno-konserwatorskich czy też nadzorów konserwatorskich. Inwentaryzacje pomiarowo-rysunkowe nie są objęte kontrolą jakościową. Ta sytuacja powoduje, że przekazywane dokumentacje mogą być niekompletne lub mogą posiadać wiele niedociągnięć i braków pomiarowych.

Dokładność pomiarów inwentaryzacyjnych oraz sposób ich przedstawiania zależy od celu jakiego później inwentaryzacja ma służyć. W zależności od koniecznej dokładności istnieje możliwość wyboru wariantu pomiarowego z kilku różnych metod. Użyty podczas inwentaryzacji sprzęt pozwala uzyskać pomiary o różnych dokładnościach. Najmniejszą dokładność w jednostkach miary posiada dokumentacja fotograficzna. Wynika to z zaburzenia skali różnych części obrazu spowodowanych perspektywą. Alternatywą dla dokumentacji fotograficznej jest fotogrametria. Najbardziej tradycyjną metodą pomiarową jest pomiar ręczny uzupełniany niekiedy metoda-

mi geodezyjnymi (w przypadku skomplikowanych geometrii obiektów). Zastosowanie pomiaru ręcznego nie wymaga szczególnych umiejętności oraz kosztownego sprzętu.

Najbardziej dokładną ale za razem i najbardziej kosztowną metodą jest bez wątpienia skaning laserowy 3D. Skanowanie laserowe wymaga ogromnej wiedzy i umiejętności zarówno operatora skanera jak i osoby pracującej później z wygenerowaną chmurą punktów.

Metodami uzupełniającymi inwentaryzację będą fotografie przy użyciu dronów oraz aparatów sferycznych. Przy pomocy drona możliwe jest wykonanie zdjęć fragmentów budynku nie dostępných bez użycia specjalistycznego osprzętu.

2.1. Tradycyjne techniki pomiarowe

Podstawową metodą wykonywania inwentaryzacji jest tradycyjny pomiar ręczny. Jest to najstarszy, najprostszy sposób dokonywania pomiarów. Obecnie, w przypadku inwentaryzacji historycznych ruin, metoda ta posiada spore ograniczenia spowodowane skalą obiektów oraz brakiem dostępu do niektórych elementów. Do wykonywania pomiarów metodą tradycyjną wykorzystuje się taśmy, miarki oraz dalmierze laserowe. Uzyskane informacje, przy użyciu tradycyjnych i komputerowych metod kreślarskich należy zamienić na dokumentację rysunkową.

Inwentaryzację rozpoczyna się od wizji terenowej, następnie sporządzany jest szkic pomiarowy. Do stworzenia rzutów poziomych pobierane są pomiary ze wszystkich ścian pomieszczeń oraz ich elementów, włącznie ze szczytami. Pomiary powinny być wykonywane na jednej wysokości. By uniknąć błędów pomiarowych należy zastosować tzw. „zapis sznurowy”, czyli kolejno odczytywać wymiary z charakterystycznych punktów na ścianie. Należy pamiętać, by długie ściany zmierzyć dwukrotnie oraz podać poziom posadzki względem punktu odniesienia, przyjętego dla danego obiektu lub jego fragmentu. Grubość murów powinna być mierzona w miejscach, gdzie można bezpośrednio uzyskać pełen wymiar bądź można wykonać to odcinkowo¹.

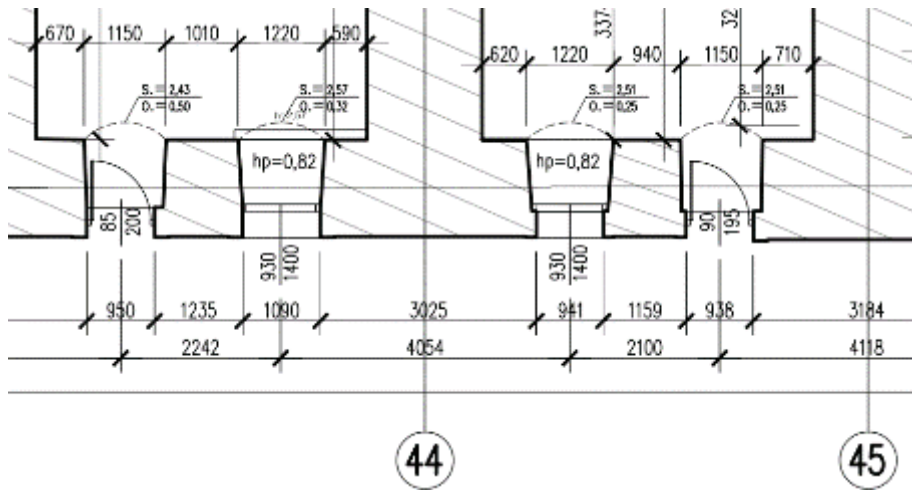
Wykonując pomiary rzutów poziomych podaje się wymiary w świetle wszystkich otworów oraz wnęk, wysokości parapetów, sklepień. Otwory drzwiowe i okienne powinny być zmierzone zarówno w świetle otworu jak i ościeżnicy. W wykonywaniu inwentaryzacji metodą tradycyjną niezwykle ważne jest skoordynowanie rzutów wszystkich kondygnacji za pomocą pionów komunikacyjnych i otworów. Wymiary należy podawać tylko i wyłącznie wtedy, gdy zostały one zmierzone bezpośrednio, a nie na wnioskach z obliczeń.

Pomiary elewacji powinny być wykonywane na samym końcu, na podstawie rzutów oraz wyznaczonych wysokości punktów charakterystycznych. Wykonując rysun-

¹ J. Uścińowicz, *Standardy dokumentacji konserwatorskiej obiektów architektury drewnianej jako podstawa monitoringu i zarządzania*, [w:] *Dokumentacja i monitoring w zarządzaniu obiektami budownictwa drewnianego w Muzeum Rolnictwa im. ks. Krzysztofa Klukaw Ciecchanowcu oraz Muzeum Ryfylke*. pod red. A Grabowska, Ciecchanowiec 2015, s. 43–67

ki inwentaryzacyjne elewacji powinno zwrócić się szczególną uwagę na wszelkiego rodzaju uszkodzenia, ubytki, pęknięcia, materiały wtórne. Ważne jest dokładnie określenie ich występowania oraz odpowiednie opisanie. Zarówno pomieszczenia, miejsca niedostępne do pomiaru należy oznaczyć i opisać na rysunkach, a przy elementach znajdujących się na znacznych wysokościach, dodatkowo podać sposób w jaki je wykreślono.

Wynikiem inwentaryzacji wykonywanej metodą tradycyjną jest notata inwentaryzacyjna, stworzona w trakcie pobytu na obiekcie. Składają się na nią rysunki wykonane w trakcie pomiarów wraz z naniesionymi wymiarami oraz rozrysowanymi detalami. Na podstawie notaty inwentaryzacyjnej tworzona jest później właściwa dokumentacja obiektu.

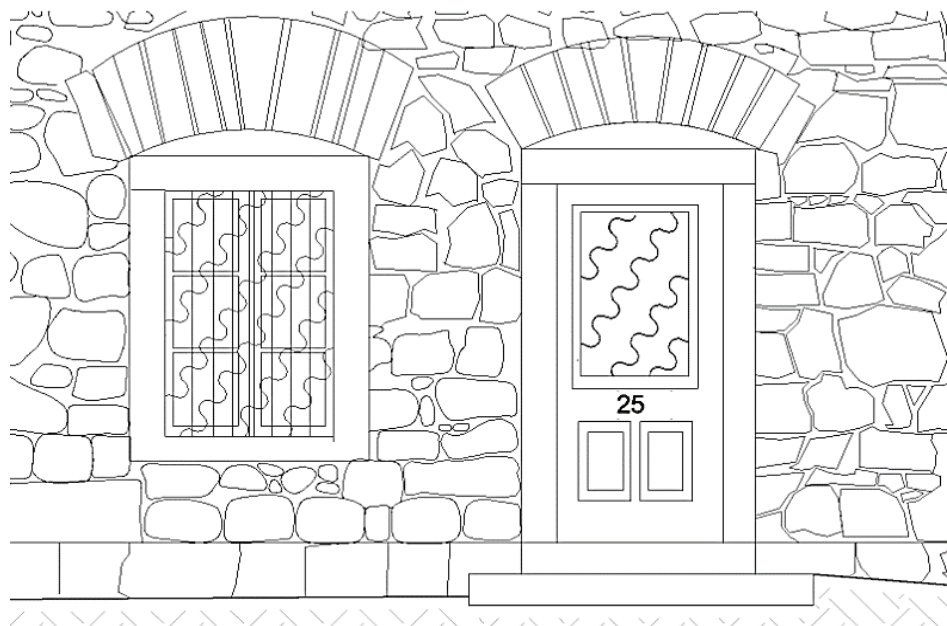


Rys. 1 Fragment inwentaryzacji końcowej Donżonu Twierdzy Kłodzko – przekrój poziomy kondygnacji „0” – inwentaryzacja wykonana przy pomocy komputerowego programu kreślarskiego

Metoda tradycyjna jest niezwykle czasochłonna oraz wymaga dużego nakładu pracy, a także nie zawsze daje możliwość dokładnego zmierzenia elementów ze względu na ich niedostępność. Pomiary wykonywane w sposób manualny nie dają możliwości odwzorowania geometrii rzutów, dlatego metoda ta jest polecana jedynie do prostych obiektów. Istnieje także duże ryzyko popełnienia błędu pomiarowego przez osobę mierzącą. Zaletą tradycyjnej metody pomiarowej jest możliwość dokonania szczegółowej analizy opracowywanej struktury budowlanej.



Fot. 1 Pomiary tradycyjne elewacji Donżonu Twierdzy Kłodzko



Rys. 2 Widok elewacji Donżonu Twierdzy Kłodzko wykonany po pomiarach metodą tradycyjną

2.2. Metoda geodezyjna

Można wyróżnić dwie metody geodezyjne pomocne przy wykonywaniu inwentaryzacyjnych. Jedną z nich wykorzystuje w tym celu niwelator, drugą natomiast urządzenia tachimetryczne. Niwelator jest to instrument geodezyjny, który umożliwia pomiar różnicy wysokości pomiędzy rzędnymi terenowymi. Dodatkowo stosowana jest również technologia dokonywania precyzyjnych pomiarów wykorzystująca nawigację satelitarną, nazywana RTK (Real Time Kinematic) oraz systemy teledetekcji GIS, w tym LIDAR - umożliwiającej identyfikację obiektów przesłoniętych zielenią.

Wśród urządzeń tachimetrycznych, w ostatnim czasie bardzo często wykorzystywane są instrumenty do pomiaru odległości bez konieczności stosowania lustra. Dzięki nim możliwe jest wyznaczenie geometrii obiektu oraz pomiar osnowy fotogrametrycznej. Dlatego też tachimetr bezlustrowy może być wykorzystywany do tworzenia inwentaryzacji architektonicznej, i co więcej, obecnie zaawansowane pomiary tachimetryczne są najczęściej wykorzystywanymi metodami w praktyce. Inwentaryzowanie obiektu z użyciem tachimetru opiera się na pomiarze kątów i odległości. Pomiar długości odcinka jest możliwy dzięki wbudowanemu w urządzenie precyzyjnemu dalmierzowi laserowemu. Odległość określana jest z przyrostów współrzędnych będących pomiędzy stanowiskiem instrumentu mierzącego, a mierzonym punktem. Tachimetr ma możliwość mierzenia wyselekcjonowanych punktów, które określają charakterystyczne miejsca na obiekcie.

Tachimetr w połączeniu z odpowiednim oprogramowaniem może w znaczny sposób przyspieszyć pracę oraz przede wszystkim zapewnić dużą dokładność pomiarów. Pomiary tachimetrem sprawdzą się do stworzenia rzutów, przekrojów i prostych elewacji. Jest jednak także możliwość stworzenia pełnej inwentaryzacji przy użyciu tego instrumentu, jednakże ogromnym minusem tego sposobu jest duża ilość czasu, jaką trzeba spędzić na obiekcie. W tym przypadku dokumentacja jest tworzona na bieżąco, także istnieje możliwość korygowania ewentualnych błędów na bieżąco. Przed przystąpieniem do pracy należy precyzyjnie wyznaczyć płaszczyzny cięcia. Efektem tego są rysunki powstałe w programie typu CAD, bezpośrednio na miejscu.

Zaletą tej metody jest jej precyzyjność. Użycie tachimetru, w przeciwieństwie do metody tradycyjnej, pozwala na dokonanie dokładnych pomiarów dużych obiektów. W zależności od modelu tachimetru bezlustrowego zasięg wynosi od 300 m do aż 2000 m, a dokładność odpowiednio do odległości wynosi około 2 do 5 mm. Jednak należy pamiętać, że dokładność pomiarów może się różnić w zależności od materiału jakiego odbijana będzie wiązka. Przy gładkich materiałach (np. marmur) oraz przy małym kącie padania promienia lasera wyniki pomiaru mogą się znacząco różnić od stanu faktycznego².

Sama w sobie metoda tachimetryczna jest czasochłonna, dlatego dobrze byłoby połączyć ze sobą dwie metody, zarówno pomiary geodezyjne jak i pomiary ręczne. Dzięki

² H. Klimkowska, A. Wróbel, *Uwagi o wykorzystaniu tachimetrów bezlustrowych w inwentaryzacji architektonicznej*, „Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji,” vol. 16, 2016, s. 297–303.

ki tachimetrowi jesteśmy w stanie uzyskać geometrię ścian, natomiast mierząc miarką bądź dalmierzem możliwe jest domierzenie dokładniejszych elementów. Dzięki połączeniu tych dwóch metod możliwe jest dokładne odwzorowanie rzeczywistego wyglądu ruiny.

2.3. Dokumentacja fotograficzna (tradycyjna, sferyczna, przy użyciu drona)

Dokumentacja fotograficzna jest niezbędnym elementem do przeprowadzenia szczegółowej analizy obiektu oraz materiałem uzupełniającym do dokumentacji rysunkowej. Zdjęcia należy wykonywać w najlepszej możliwej rozdzielczości i jakości. Dokumentacja fotograficzna powinna być wykonana także przy zastosowaniu inwentaryzacji fotogrametrycznej, jako uzupełnienie materiału pomiarowego.

W skład dokumentacji fotograficznej wchodzi:

- spis fotografii,
- spis ponumerowanych oraz dokładnie opisanych zdjęć,
- graficzne przedstawienia planu stanowisk fotograficznych.

Na katalog zdjęć powinny się składać fotografie ukazujące ogólną charakterystykę bryły, jej usytuowanie w przestrzeni, wszystkie elewacje oraz detale. Zdjęcia powinny być ułożone w taki sposób, by zapewnić łatwą orientację w obiekcie oraz umożliwić szybko zlokalizowanie fotografii na dokumentacji³.

Można wyróżnić trzy zasadnicze plany zdjęciowe:

- I – fotografie przedstawiające obiekt wraz z otoczeniem; obejmuje pełne kadry, bez ucinania obiektu, ukazując kontekst, ogólną charakterystykę bryły, jej osadzenie w przestrzeni, pełne elewacje,
- II – fotografie przedstawiające pewne elementy obiektu, tj. cały element okienny, drzwiowy,
- III – fotografie przedstawiające zbliżenia związane z detalem, czyli pęknięcia, przebarwienia, uszkodzenia, itd.

W zależności od użytych urządzeń inwentaryzację fotograficzną podzielić możemy na: fotografia tradycyjna, fotografia sferyczna, zdjęcia dronem.

Fotografia tradycyjna

Fotografia tradycyjna wykonywana jest przy użyciu różnego rodzaju aparatów fotograficznych. Sprzęt stosowany do robienia zdjęć wybierany jest w zależności od umiejętności i preferencji użytkownika.

Dokumentacja fotograficzna powinna przedstawiać cały obiekt oraz jego części, detale, charakterystyczne elementy, elewacje oraz elementy wystroju architektonicznego. Fotografie powinny być wykonane z charakterystycznych punktów widokowych, by

³ Wytyczne Techniczne G-3.4, Inwentaryzacja zespołów urbanistycznych, zespołów zieleni i obiektów architektury, GUGiK, Warszawa, 1981,

umożliwić zobrazowanie całego obiektu bądź jego fragmentów. Zdjęcia elewacji, charakterystycznych elementów, otworów, materiałów, uszkodzeń muru należy wykonać w sposób zbliżony do ortogonalnego, po to by uniknąć zniekształceń perspektywicznych obiektu. Fotografie detali należy wykonać wraz z czytelną skalą porównawczą.

Fotografia sferyczna

Jest nowoczesnym rodzajem fotografii. Dzięki zakresowi widoku wynoszącym 360° w poziomie oraz 180° w pionie, umożliwia obrót wokół własnej osi i dokumentowanie obrazu w dół i prosto do góry. Daje to efekt swobodnego rozglądania się. W przeciwieństwie do tradycyjnej fotografii statycznej, która ukazuje jedynie wycinek rzeczywistości, fotografia sferyczna nie jest ograniczona przez tzw. kadr.

Fotografia sferyczna wykonywana jest przy użyciu aparatu panoramicznego, kamery 360° , bądź też można łączyć kolejno pojedyncze zdjęcia wykorzystując programy komputerowe. Fotografie powinny być wykonane w taki sposób, by posiadać punkty kontrolne pozwalające na połączenie kadrów. Dlatego też konieczne jest, by każde kolejne zachodziło na siebie w około 20–40%.

Zdjęcia wykonane przez kamerę 360° oraz oglądane bez użycia odpowiedniego do tego oprogramowania tworzy rozłożony i płaski obraz. Efekt swobodnego rozglądania się jest możliwy do uzyskania dopiero przy zastosowaniu programów komputerowych. Fotografie tworzone są w dobrej rozdzielczości, co umożliwia spore zbliżenia. Przybliżając zdjęcie, obraz staje się płaski. Fotografia sferyczna stanowi idealny, uzupełniający materiał inwentaryzacyjny, który pozwala również na stworzenie wirtualnego spaceru po obiekcie.



Fot. 2 Fotografia pochodząca z kamery 360° , widok płaskiego obrazu

Bezzałogowe statki powietrzne, czyli drony są to urządzenia zdalnie sterowane przez operatora, choć występują również modele poruszające się całkowicie autonomicznie. Niewątpliwie posiadają ogromny potencjał, bowiem umożliwiają wykonanie wielu prac, które są nieosiągalne przy zastosowaniu tradycyjnych metod.

Technologia ta, przy inwentaryzacji obiektów w ruinie, pozwala na dotarcie w miejsca, które są niemożliwe do sfotografowania przy użyciu tradycyjnych metod dokumentacji fotograficznej. Drony pozwalają na objęcie całej bryły obiektu z góry i dzięki temu są pomocne w określeniu dokładnego kształtu ruiny.



Fot. 3 Zdjęcie korony muru wykonane przy pomocy drona

2.4. Fotogrametria

Fotogrametria to pomiar w celu określenia dokładnej geometrii danego obiektu na podstawie zdjęć fotogrametrycznych. Technika ta jest szczególnie pomocna przy sporządzaniu planów elewacji. Umożliwia szybsze rysunkowe przedstawienie powierzchni, a w przypadku elewacji pozwala na rezygnację z dodatkowych środków pomocniczych, takich jak rusztowania, podnośniki hydrauliczne itp. Fotogrametria nadaje się przede wszystkim do rejestrowania równych i zdobionych detalami powierzchni, co sprawia, że jej zastosowanie jest szczególnie przydatne w przypadku bardzo dokładnych inwentaryzacji rysunkowych architektury ceglanej i kamiennej.

Dzięki fotografii cyfrowej o wysokiej rozdzielczości i przyjaznemu dla użytkowników oprogramowaniu, fotogrametrię mogą obecnie stosować również nieprofesjonaliści w tej dziedzinie. W przypadku gładkich powierzchni ścian ceglanych, metoda ta ma w stosunku do innych tą zaletę, że wszystkie pojedyncze cegły mogą być odrysowane od zdjęć, bez dodatkowych pomiarów. W ten sposób można na rysunku przedstawić nie tylko charakterystyczne wiązanie cegieł, lecz również każdą zmianę w murze (np. spoiny lub wtórnie zamurowane otwory) co dla badań architektonicznych ma decydujące znaczenie. Wystające z płaszczyzny lub położone głębiej elementy należy uprzednio zmierzyć tachymetrem, podobnie jak niezbędne przy fotogrametrii – punkty

dostosowania (foto punkty). Rysunki zwykle sporządza się za pomocą programów komputerowych, o ile jest to możliwe, bezpośrednio przy obiekcie, tak aby mieć możliwość stałego porównywania rysunków z oryginałem.

Precyzyjne rysunki elewacji wykonane w tej mogą posłużyć w dalszych badaniach za podstawę do wykonania rozwarstwienia chronologicznego, a w trakcie prac konserwatorskich i restauratorskich mogą być wykorzystane inwentaryzacji obszaru uszkodzeń, a po wykonaniu prac naniesienia ich zakresu.

Fotogrametrię można stosować nie tylko do przedstawienia elewacji, lecz także przy wszystkich gładkich powierzchni z dużą ilością przekształceń, np. lica murów obiektów ruinie. Zdjęcia mogą być wykonane przed rozpoczęciem badań architektonicznych i konserwatorskich oraz po ich zakończeniu. Można je pozostawić jako zdjęcia fotograficzne, ale zasadniczo przerysowanie zdjęć fotogrametrycznych jest korzystne dla badań architektonicznych, ponieważ zmusza do bardzo szczegółowej analizy powierzchni obiektu. Dodatkowo przekształcenie zdjęć w rysunki jest czasochłonne.

Wykonane inwentaryzacje w technice fotogrametrii mogą spełniać dwie funkcje:

- mogą funkcjonować jako plany, gdyż wykonane zgodnie ze skalą,
- mogą posłużyć jako dokumentacja fotograficzna, gdy są pozostawione w formie fotografii.

Zdjęcia mają bardzo wysoką rozdzielczość i odzwierciedlają wszystkie detale, a w pliku CAD w którym są wprowadzone można uzyskać wszystkie wymiary. W wielu przypadkach mimo, że powierzchnie murów są zdeformowane, zniszczone i wielokrotnie naprawiane, na licach zachowuje się dużo oryginału, którego stan pozwala na uzyskanie wiarygodnych informacji o obiekcie w momencie jego wzniesienia. Fotogrametria ścian może posłużyć w badaniach architektonicznych za podstawę do rekonstrukcji pierwotnej budowli.

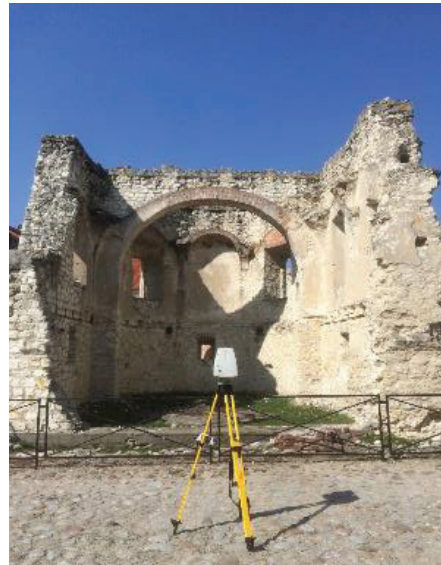
Etapy pracy w trakcie wykonywania fotogrametrii obiektów pozostających w formie trwałej ruiny:

- *Prace przygotowawcze.* Oczyszczanie murów z chwastów i krzewów oraz odsłanianie części murów zasypanych ziemią.
- *Oznakowanie murów.* Konieczne jest założenie na dokumentowanej powierzchni regularnej kwadratowej siatki służącej do późniejszej komputerowej korekty błędów optyki. Do wyznaczania siatki punktów stosuje się: sznury murarskie, taśmy, piony, poziomice oraz niwelatory. Fotopunkt – punkt terenowy jednoznacznie określony sytuacyjnie i wysokościowo, o współrzędnych otrzymanych z bezpośredniego pomiaru geodezyjnego lub pomiaru metodą satelitarną GPS, mający swój odpowiednik na obrazie fotograficznym zdjęcia.
- *Pomiar punktów.* Pomiar geodezyjny fotopunktów wykonywany jest tachimetrem elektronicznym, zapisującym ich współrzędne w wewnętrznej bazie danych, którą następnie transmituje się do komputera. Następnie przetworzone komputerowo punkty łączone ze sobą liniami prostymi tworzą schemat murów w postaci siatki kwadratów.

- *Fotografowanie:*
 - Do fotografowania murów wykorzystywane są wysokiej klasy cyfrowe aparaty fotograficzne.
 - Każdy kwadrat siatki punktów fotografowano oddzielnie.
 - Aby uniknąć błędu perspektywy należy wykonywać zdjęcia w płaszczyźnie prostopadłej.
 - Intensywność oświetlenia wpływa na kontrast zdjęć, co wyraźnie widać przy ich łączeniu, więc należy je wykonywać przy podobnym natężeniu światła.
- *Obróbka zdjęć.* Wprostowanie perspektywy i obrysowanie murów. Doprowadzenie wymiarów zniekształconych przez fotografie do wymiarów faktycznych obserwowanych w terenie, łączenie zdjęć.
- *Opracowanie wyników.* Na opracowane wcześniej zdjęcia nanoszona jest siatka wysokościowa, następnie łączy się poszczególne zdjęcia, tak aby stworzyć rozwinięcia wszystkich elewacji, na koniec opisuje wszystkie rysunki.

2.5. Skanowanie 3D

Skaning laserowy to bezstykowa metoda pomiaru, która jest, z technicznego punktu widzenia, najdokładniejszym sposobem sporządzenia pomiarów inwentaryzacyjnych. Zasada działania urządzenia skanującego opiera się na technologii detekcji lasera impulsowego odbitego od obiektu. Wiązka laserowa wysłana przez skaner ulega odbiciu od punktu, powracając „przekazuje” fotodiodzie informacje na temat czasu odbicia co pozwala na określenie odległości elementu. Dzięki temu urządzenie zapisuje współrzędne XYZ każdego pojedynczego punktu tworząc przestrzenny zbiór.



Fot. 4 Skaner Leica C10 podczas prac terenowych na Zamku w Janowcu

Wizualizując dane w jednym układzie otrzymujemy chmurę punktów, która w rezultacie jest cyfrowym odwzorowaniem obiektu objętego inwentaryzacją. Pomiar wielu punktów i ich wzajemnych relacji przestrzennych jest możliwy dzięki obrotom skanera wokół osi skierowanej prostopadle do płaszczyzny podstawy oraz jednoczesnej rotacji głowicy wokół osi równoległej.

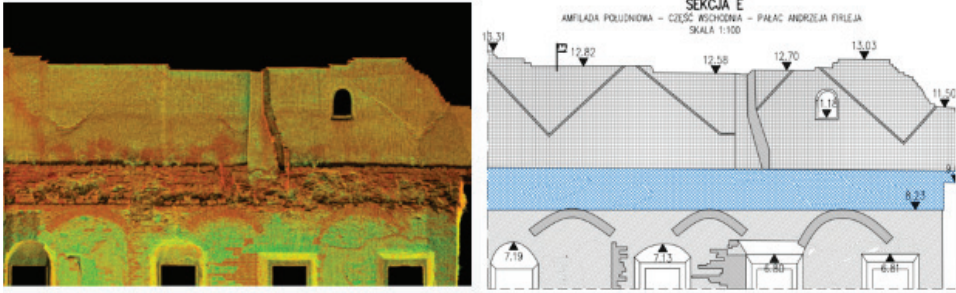
Dodatkową informacją dostarczaną przez laser jest intensywność odbicia światła, która pozwala na zróżnicowanie elementów i powierzchni w obiekcie podlegającym pomiarom. Bardzo pomocna przy opracowywaniu chmury punktów jest możliwość wykonywania fotografii przez urządzenia skanujące. Procesory przetwarzające zdjęcia i współrzędne XYZ przypisują punktom wartość RGB nadając chmurze realistyczną teksturę⁴.



Rys. 3 Chmura punktów powstała w wyniku opracowania danych przestrzennych pozyskanych ze skanera Leica C10

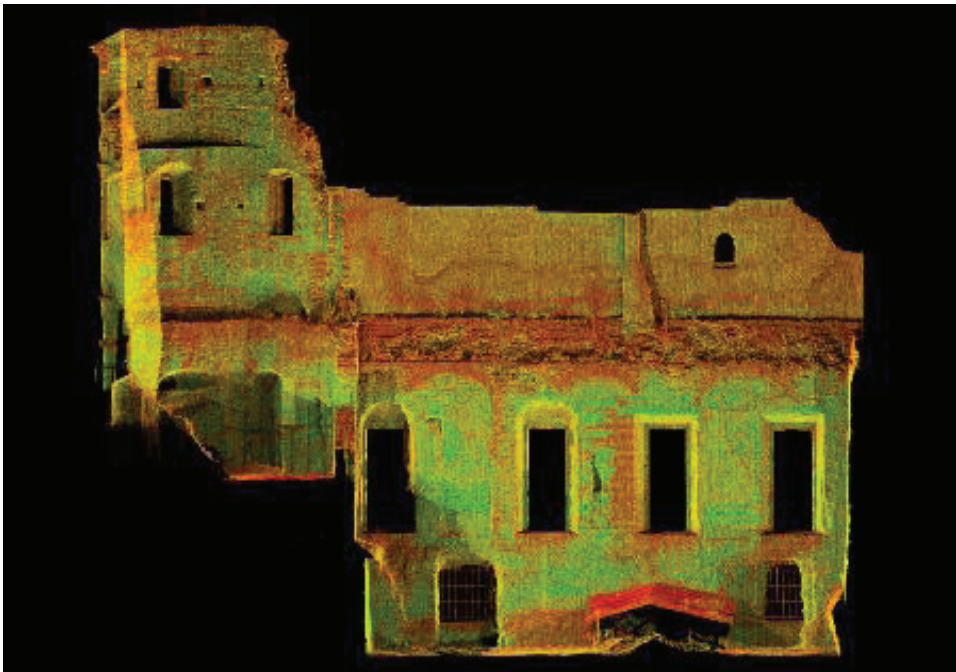
Pomiary skanerem laserowym pozwalają na pozyskiwanie wielokrotnie większej ilości danych w dużo mniejszym przedziale czasowym niż pomiary tradycyjnymi sposobami. Inwentaryzacja opracowana za pomocą skaningu 3D pozwala na stworzenie dokładnego i szczegółowego opracowania, które ma duże znaczenie w przypadku pracy nad obiektami zabytkowymi.

⁴ A. Gołębniak, *Rola nowych technik dokumentacyjno-pomiarowych w interdyscyplinarnych działaniach badawczo-konserwatorskich*, „Wiadomości Konserwatorskie” 40/2014, s. 83–93.

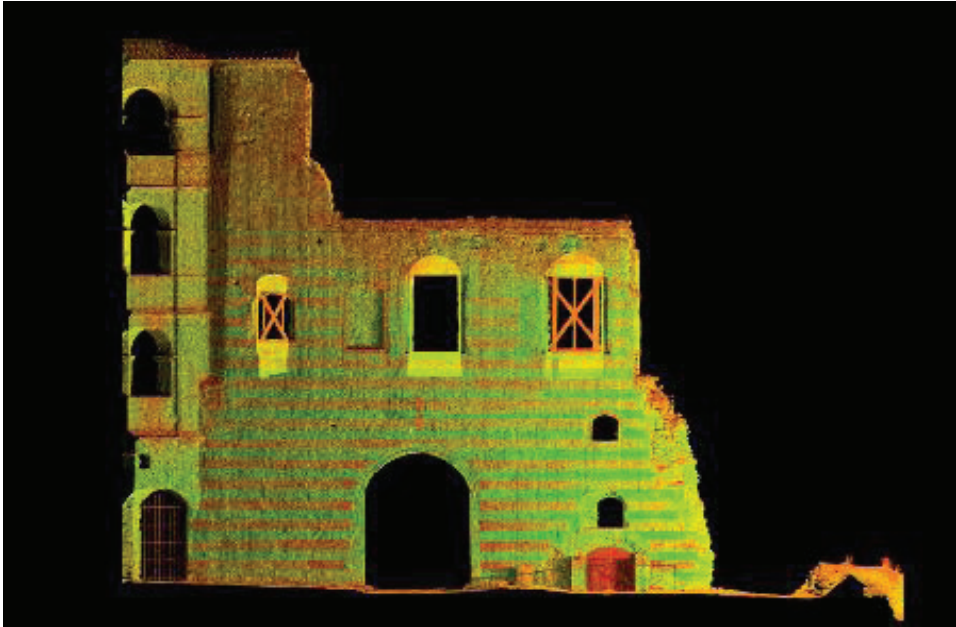


Rys. 4 Widok elewacji obiektu zamku w Janowcu opracowany na podstawie skanu 3D

Duży zasięg lasera, w zależności od modelu, umożliwia sprawny pomiar obiektów o rozległej skali. Jest to znaczny atut przy inwentaryzowaniu dużych założeń lub ciężko dostępnych z uwagi na ich lokalizację i obszar zabudowy. Gęstość pozyskanych punktów ułatwia szczegółowe odwzorowanie struktury murów oraz geometrii elementów przestrzennych. Stworzenie chmury punktów całego obiektu jest możliwe dzięki łączeniu pojedynczych zbiorów za pomocą definiowanych tarcz umieszczanych w terenie lub wspólnych punktów ustalanych w trakcie obróbki dedykowanymi programami komputerowymi.



Rys. 5 Rozwinięcie ściany południowej dziedzińca uzyskanej z chmury punktów



Rys. 6 Rozwinięcie ściany wschodniej dziedzińca uzyskanej z chmury punktów

Analogicznie do pozostałych metod inwentaryzacji, materiał uzyskany za pomocą skanera laserowego musi zostać przygotowany i przedstawiony w formie rysunków technicznych. Jednakże, w odróżnieniu od pomiarów ręcznych, prawdopodobieństwo popełnienia błędu przy odwzorowaniu grubości przegród budowlanych i ich geometrii jest bliskie zeru.

W przypadku niektórych złożonych układów budynku lub jego elementów, jak na przykład kondygnacje podziemne czy konstrukcje przykryte grubą warstwą ziemi, pomiary sprowadzają się do wykorzystywania kilku urządzeń umożliwiających odwzorowanie faktycznych parametrów. Efektem czego jest wydłużenie procesu pozyskiwania danych i większe prawdopodobieństwo popełnienia błędu. Przeważającą zaletą wykorzystywania skanerów laserowych jest stosunek czasu pracy do uzyskiwanej dokładności i wierności odwzorowania istotnych parametrów obiektów.

Metoda skaningu laserowego powinna być wykonywana przez osoby wyspecjalizowane w obsłudze sprzętu oraz posiadające doświadczenie w wykonywaniu inwentaryzacji obiektów architektonicznych. Niezwykle ważna jest także ich współpraca z architektem już na etapie realizowanych prac.

3. Badania *in situ* materiałów i elementów konstrukcji

Badania *in situ* prowadzone na obiekcie mają najczęściej charakter badań wstępnych, informujących o ogólnym stanie materiałów i elementów konstrukcji. Prowadzone w większości jako badania nieniszczące pozwalają na niemalże natychmiastowe otrzymanie wyników. Badania *in situ* są pomocne w doraźnej ocenie obiektu i przy wstępnym planowaniu dalszych działań. Dość często na podstawie badań *in situ* wyznaczone są miejsca, elementy lub materiały, które należy przebadania laboratoryjnie.

3.1. Badania podłoża gruntowego

Trwałość obiektów budowlanych, obok zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych i użytych materiałów budowlanych, w decydującym stopniu zależy od lokalnych warunków gruntowo-wodnych podłoża, na które składa się rodzaj gruntów i ich przestrzenne wykształcenie oraz dynamika i chemizm występujących w nich wód. Te abiotyczne elementy środowiska współpracujące z obiektem budowlanym tylko z pozoru są niezmiennie i trwale w czasie. Zmienność warunków posadowienia może wynikać zarówno z oddziaływań wewnętrznych środowiska geologicznego, zmian klimatycznych, biocenotycznych a także coraz intensywniejszych oddziaływań antropogenicznych. Współcześnie projektowanie posadowienia obiektów budowlanych oraz oceny stateczności istniejących, w tym zabytkowych obiektów dokonuje się w oparciu o ujętą w ramy prawne metodykę postępowania geologiczno-inżynierskiego lub geotechnicznego.

Potrzeba badań geotechnicznych i geologiczno-inżynierskich podłoża gruntowo-wodnego obiektów zabytkowych wynika z reguły w sytuacjach awaryjnych budowli lub też konieczności zmiany obciążeń (z reguły dociążenia) fundamentów w ramach prowadzonych prac remontowych lub rewaloryzacyjnych. W pierwszym przypadku celem badań jest określenie przyczyny uszkodzeń w długotrwałym użytkowaniu obiektu z potwierdzeniem lub wykluczeniem przyczyn natury geotechnicznej. W drugim przypadku celem jest określenie parametrów podłoża do wyznaczenia dodatkowych osiadań związanych ze wzrostem obciążeń. Uzyskanie właściwych rozwiązań wiąże się z dobrą oceną zarówno pracy i wymagań obiektu budowlanego jak i właściwości podłoża, co z kolei rzutuje na zakres i rodzaj niezbędnych badań geologicznych i geotechnicznych. Wybranie właściwej procedury postępowania jest dodatkowo skomplikowane faktem, że grunt budowlany w rejonie obiektu zabytkowego podlega z reguły także ochronie konserwatorskiej, a prowadzone w jego obrębie prace archeologiczne i archeologiczno-architektoniczne, jego naturalne i historyczne (kolejne nawarstwienia) wykształcenie na znacznych fragmentach zniekształcają. Dlatego też na wstępnym etapie badań, oprócz rutynowej analizy archiwalnych materiałów geologicznych, hydrogeologicznych, geotechnicznych, właściwym jest przeprowadzenie studiów dokumentacji prac archeologicznych (odkrywek i wykopów) i zlokalizowanie ich w środowisku podłoża budowlanego. Prace archeologiczne kończone są w pionie z reguły po osiągnięciu tzw. calca, czyli geotechnicznie gruntu rodzimego. Jest to najczęściej też poziom posadowienia naj-

głębszych elementów obiektu. Tak więc istnieje zawsze potrzeba wykonania rozpoznania głębszego, gdyż naprężenia wynikające z obciążeń obiektu oddziałują na grunty leżące znacznie głębiej oraz źródła i mechanizmy oddziaływania środowiska wodnego pochodzące od wód gruntowych także z reguły są poniżej poziomu posadowienia. Istotnym elementem rozpoznania jest także wnikliwa analiza uwarunkowań ekologicznych otoczenia obiektu, szczególnie w zakresie istnienia (lub udokumentowanego usunięcia) drzew. Uwzględniając te uwagi dalszy tok postępowania przy rozpoznawaniu warunków gruntowo-wodnych posadowienia obiektu zabytkowego, w zakresie nasycenia punktów i profili badawczych jest analogiczny jak w rutynowych badaniach geologiczno-inżynierskich, co ujęto w formie monografii „Zasady dokumentowania geologiczno-inżynierskiego (w świetle wymagań Eurokodu 7)” [red. E. Majer, M. Sokołowska, Z. Frankowski, PIG-PIB, 2018]. Wskazaniem jest jednak, z uwagi na wrażliwość konserwatorską, stosowania metod badawczych mniej inwazyjnych. I tak w miejsce dużej ilości wierceń i wykopów należy alternatywnie stosować metody geofizyczne, a w miejsce sondowań dynamicznych, sondowania statyczne lub próbne obciążenia. Z uwagi na możliwość występowania w sąsiedztwie obiektu wcześniejszych założeń, podziemnych elementów funkcjonalnych, lub nawarstwień poziomów (nasypów) kulturowych szczególnie przydatnymi wydają się metody georadarowe, elektrooporowe i mikrograwimetryczne. Pomocną przy analizie warunków gruntowo-wodnych rejonu obiektu jest fotointerpretacja zdjęć lotniczych, a do oceny współpracy obiektu z podłożem i otoczeniem (biocenozy) interpretacja zdjęć archiwalnych oraz historycznych materiałów kartograficznych.

Komplet informacji uzyskany w wyniku przeprowadzonych analiz i badań powinien pozwolić na opracowanie dostatecznie poprawnej prognozy zjawisk i ich rozwoju w czasie, które wystąpią w podłożu i w konstrukcji obiektu współpracującego z tym podłożem. Prognoza powinna być podana w takiej formie, aby mogła być wykorzystana przez projektanta, wykonawcę i użytkownika obiektu.

3.1.1. Stopień skomplikowania warunków gruntowo-wodnych i kategoria geotechniczna

Kategoria geotechniczna jest pochodną warunków gruntowo-wodnych oraz czynników konstrukcyjnych istniejącego lub projektowanego obiektu, a także jego oddziaływań i stopnia ich złożoności, poziomu bezpieczeństwa powszechnego, wartości materialnej i zabytkowej oraz oddziaływań na środowisko. Kategorię geotechniczną obiektu lub jego części określa projektant po merytorycznej konsultacji z geotechnikiem lub geologiem. Kategoria geotechniczna jest oceną podłoża budowlanego na aktualnym poziomie rozpoznania warunków gruntowo-wodnych i może ulegać zmianie w trakcie uzyskiwania dodatkowych informacji lub zmian projektu budowlanego.

Z kategorii geotechnicznej wynika zakres niezbędnego rozpoznania oraz badań geologiczno-inżynierskich i geotechnicznych. Obiekty zabytkowe, bez względu na stopień skomplikowania podłoża gruntowego rozpatruje się w trzeciej kategorii geotechnicznej,

która wymaga sporządzenia dokumentacji badań podłoża gruntowego (Ground Investigation Report – GIR, wg PN-EN 1997-2) oraz/lub dodatkowo dokumentacji geologiczno-inżynierskiej, zgodnie z prawem geologiczno-górnictwem. Kapitalnym uzupełnieniem rutynowych dokumentacji geotechnicznych i geologiczno-inżynierskich dla dużych obiektów i zespołów zabytkowych jest wykonywanie raportów oddziaływania na środowisko, które obok charakterystyki środowiska abiotycznego, wnoszą także potencjalne oddziaływania towarzyszących obiektom biocenozy oraz presji antropogenicznych, co jest szczególnie istotne przy formułowaniu długookresowych prognoz stateczności i trwałości obiektów zabytkowych. W ramach obowiązujących przepisów badania podłoża gruntowo-wodnego obiektów zabytkowych wymagają wykonania dokumentacji badań podłoża i/lub dokumentacji geologiczno-inżynierskiej (DGI).

Dokumentacja badań podłoża (GIR) to dokument zawierający wyniki badań polowych i laboratoryjnych, interpretację badań, zestawienie uzyskanych i wyprowadzonych wartości parametrów geotechnicznych, opis wydzielonych warstw, model budowy geologicznej, ocenę geotechniczną oraz zalecenia dalszych prac i monitoringu. Dokumentacja badań podłoża nie podlega procedurze administracyjnej oraz archiwizacji.

Dokumentacja geologiczno-inżynierska (DGI) to dokument syntetyzujący wszystkie wyniki badań (archiwalnych i wykonanych) bezpośredniej strefy rozpoznania warunków gruntowo-wodnych oraz terenów sąsiednich. Zgodnie z ustawą Prawo geologiczne i górnicze DGI zawiera szczegółową charakterystykę budowy geologicznej, warunki geologiczno-inżynierskie i hydrogeologiczne podłoża gruntowego oraz bonitację geotechniczną. W przypadku, gdy zakres działań budowlanych i geotechnicznych nie wymagają wykonania raportu o oddziaływaniu przedsięwzięcia na środowisko, dokumentacja powinna zawierać także analizę zagrożeń środowiska jakie mogą wystąpić na skutek realizacji przedsięwzięcia.

3.1.2. Etapy dokumentowania geologiczno-inżynierskiego

Dokumentowanie to metody postępowania ustalone na podstawie przepisów prawa, norm i dobrych praktyk inżynierskich polegający na:

- zbieraniu dostępnych, istotnych dla planowanego przedsięwzięcia budowlanego w obrębie obiektu zabytkowego, informacji o terenie;
- rojektowaniu i realizacji badań terenowych i laboratoryjnych;
- analizie i interpretacji oraz ocenie uzyskanych wyników badań;
- wizualizacji i opisie wyników zebranych informacji i wykonanych badań;
- archiwizacji wyników badań.

Na proces dokumentowania zgodnie z przepisami prawa geologicznego i zaleceń Eurokodu 7 składa się kilka etapów:

- Etap 1 – zbieranie istotnych i dostępnych informacji o terenie oraz ich analiza. Na etapie tym powinno konfrontować się te materiały z ze stanem faktycznym w ramach wizji terenowej i wywiadu środowiskowego. Od ilości i jakości tych danych zebranych na tym etapie zależy rodzaj i ilość projektowanych koniecznych badań.

- Etap 2 – projektowanie badań wynika z właściwie postawionego celu badań. Szczegółowe wytyczne dotyczące zakresu projektów ujęte są w rozporządzeniu w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących PRG (Dz. U. 2015, poz. 964), a zawartość programów badań – Eurokod 7.
- Etap 3 – wykonywanie badań. Roboty geologiczne, ich rodzaj i ilość wykonuje się na podstawie projektu badań zatwierdzonego przez właściwy organ administracji geologicznej. Badania podłoża gruntowego wykonuje się na podstawie programu badań lub opinii geotechnicznej, które nie wymagają uzyskania decyzji administracyjnej. W przypadku obiektów zabytkowych zarówno PRG jak i program badań podlegają uzgodnieniom i opiniowaniu przez właściwy urząd Konserwatora Zabytków i ich wykonanie musi uzyskać jego zgodę.
- Etap 4 – analiza, przetwarzanie i interpretacja wyników badań terenowych i laboratoryjnych ma na celu stworzeniu modelu geologicznego, układu warstw gruntów i warunków hydrogeologicznych, geodynamicznych oraz pomierzonych i ustalonych wartości geotechnicznych. Dodatkowo projekt geotechniczny (budowlany) powinien zawierać zestawienie wartości charakterystycznych i obliczeniowych dla uzyskanego modelu geologicznego.
- Etap 5 – ocena wyników badań. Zalecenia i reguły oceny wyników badań szczegółowo omawia Eurokod 7. Od jakości wykonania tego etapu dokumentowania geologiczno-inżynierskiego (DGI) i/lub badań podłoża gruntowego (GIR) zależy bezpieczne projektowanie, wykonanie i eksploatacja obiektu.
- Etap 6 – przedstawienie wyników badań. Wyniki badań geologiczno-inżynierskich przedstawia się w formie dokumentacji geologiczno-inżynierskiej (DGI) z godnie z Prawem geologicznym i górniczym (Rozporządzenie MŚ z dnia 18 listopada 2016 r. w sprawie dokumentacji geologiczno-inżynierskiej). Wyniki badań podłoża gruntowego (GIR) przedstawia się zgodnie z Prawem budowlanym (Eurokod 7). Obie formy dokumentacji składają z części tekstowej i graficznej.
- Etap 7 – gromadzenie i archiwizowanie wyników badań. Zgodnie z zapisami Prawa geologicznego i górniczego projekty robót geologicznych i dokumentacje geologiczno-inżynierskie są gromadzone i archiwizowane przez organy administracji geologicznej, a dokumentacje także przez Narodowe Archiwum Geologiczne. Prawo budowlane i Eurokod 7 nie określają sposobu gromadzenia i archiwizowania badań podłoża, obowiązkiem dokumentatora i instytucji zamawiających a także opiniujących (np. Konserwator Zabytków) jest staranne zabezpieczenie i przechowywanie przez określony czas wyników badań i dokumentacji.

3.1.3. Warunki geologiczno-inżynierskie i ich zmienność regionalna

Grunty budowlane kształtowały się w różnym okresie czasu geologicznego i różnych procesach geologicznych, co powoduje ich dużą zmienność przestrzenną i regionalną. Ideą badań geotechnicznych jest wydzielanie jednorodnych warstw gruntowych, bądź ich zespołów o określonych parametrach i homogenicznym zachowaniu w trakcie

wykonywania i użytkowania obiektu budowlanego. Takim podstawowym podziałem gruntów budowlanych jest typologia uwzględniająca ich genezę, rodzaj i właściwości, warunki wodne, ukształtowanie powierzchni terenu, warunki klimatyczne oraz procesy geodynamiczne. Tak ujęta rejonizacja pozwala na właściwe lokalizowanie obiektów budowlanych (etap tworzenia planów zagospodarowania przestrzennego) oraz właściwie ukierunkować badania geologiczno-inżynierskie i geotechniczne (ustalenie parametrów obliczeniowych) na etapie projektowania nowych obiektów budowlanych oraz ich rozbudowy i modernizacji (rewaloryzacji obiektów zabytkowych). Ocena geotechniczna terenu wynika ściśle z budowy geologicznej, tak więc jego najbardziej podstawowa forma nawiązuje do regionalnych wydzieleni fizjograficznych, a uszczegółowienie postępuje wraz rozpatrywaniem poszczególnych, wyizolowanych form tektonicznych, geomorfologicznych, i wydzieleni hydrogeologicznych.

3.1.4. Woda w środowisku gruntowym

Występowanie wody w podłożu gruntowym, poza tak zwaną wilgotnością optymalną (wilgotność zapewniająca maksymalne zagęszczenie gruntów niespoistych i optymalną konsystencję gruntów spoistych), jest sytuacją geotechnicznie niepożądana. Woda utrudnia prowadzenie robót ziemnych (potrzeba odwodnienia wykopów), wpływa na obniżenie właściwości fizycznych mechanicznych gruntów oraz skał, a jej nadmiar zmienia je całkowicie (upłynnienie, kurzawki, sufozja, zjawiska krasowe). Woda (z reguły w różnym stopniu zmineralizowana) może oddziaływać agresywnie na elementy podziemne budowli. Ale też deficyt wody (wilgotności) w określonych warunkach występowania gruntów spoistych (grunty ekspansywne) może powodować duże zmiany objętościowe podłoża (skurcz), prowadzące niejednokrotnie do uszkodzenia lub awarii obiektu budowlanego.

W podłożu gruntowym woda może występować w formie mniej lub bardziej związanej (molekularnej) oraz w formie wolnej, podlegającej działaniu siły grawitacji i spadkom hydraulicznym. W strefie aeracji (powyżej stałego poziomu wód gruntowych) woda może występować w formie pary.

Obecność wilgoci gruntowej oraz wody wolnej w gruncie związana jest głównie z opadami atmosferycznymi. Podaż wód wsiąkowych (infiltrujących) przewyższająca pojemność molekularną gruntu powoduje ruch wody pionowo w dół lub wzdłuż lokalnych spadków hydraulicznych, wyznaczanych przez poziom wód gruntowych lub warstwę gruntów nieprzepuszczalnych. W zależności od lokalnego układu warstw gruntowych i ich właściwości filtracyjnych (wodoprzepuszczalności, porowatości efektywnej) możemy spodziewać się występowania wód zawieszonych, tworzących izolowany lokalny poziom podparty soczewką gruntów nieprzepuszczalnych, powyżej stałego poziomu wód gruntowych. Poziomy wód zawieszonych mają z reguły charakter sezonowy, przemijający.

Poziom wód gruntowych, tzw. strefa saturacji kształtowany jest lokalnymi warunkami gruntowymi, morfologicznymi i hydrologicznymi (cieki i zbiorniki powierzchniowe wyznaczają bazę drenażu). W dolinach rzecznych wody te z reguły występują stosun-

kowo płytko, nawiązując do poziomu rzeki. Zgodnie z morfologią głębokość występowania wód gruntowych rośnie w strefach krawędziowych i wysoczyznowych (zwiększa się strefa aeracji). Wody te lokalnie mogą mieć napięte (pod ciśnieniem) zwierciadło, a w miejscach przecięcia zwierciadła wodonośnego z powierzchnią terenu obserwowane są samowypływy w formie źródeł.

Woda może występować w gruntach porowatych niespoistych (żwir, piasek) lub skalistych uszczelnionych i kawernistych. Efektywna porowatość lub szczelnowatość decydują o pojemności (zasobności) oraz parametrach filtracji (przepływach wody w gruncie) oraz wahaniach tego poziomu, co jest szczególnie istotne w rozważaniach geotechnicznych (parcie wody, ciśnienie sphywowe, odwodnienie).

Wody gruntowe zawierają pewne ilości rozpuszczonych gazów (tlen, dwutlenek węgla, azot, metan) oraz jonów Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- . Pochodzą one z opadów oraz rozpuszczania i wymiany jonowej środowiska gruntowego. W znacznej części mają swoje źródło w czynnikach antropogenicznych i wtedy dochodzą także elementy specyficzne (fosforany, siarczany, substancje ropopochodne). Mineralizacja wody powoduje kształtowanie odczynu (kwasowości) roztworów porowych oraz wody gruntowej. W zależności od mineralizacji możemy mieć do czynienia z agresywnym oddziaływaniem środowiska wodno-gruntowego o charakterze ługującym (niska mineralizacja ogólna), węglanową (CO_2), siarczanową, magnezową, amonową.

3.1.5. Procesy geodynamiczne kształtujące warunki geologiczno-inżynierskie

Podłoże budowlane charakteryzuje się podatnością na działanie naturalnych procesów geologicznych wewnętrznych i zewnętrznych, ekologicznych oraz antropogenicznych. Procesy te mogą mieć zarówno działanie niszczące jak i budujące. Dla praktyki geotechnicznej największe znaczenie mają procesy działające niszcząco, takie, które obniżają właściwości techniczne skał i gruntów: wytrzymałość na ścislenie, rozciąganie, ścinanie, zwiększenie odkształcalności, przemieszczanie fragmentów podłoża (erozja, sufozja, osiadanie, osuwiska) lub nawet znacznych objętościowo fragmentów skorupy ziemskiej (trzęsienia ziemi). Przebieg i zakres utraty parametrów i niszczenia zależy zarówno od rodzaju podłoża gruntowego (rodzaj gruntów, geometria wykształcenia warstw gruntowych, tektonika), warunków wodnych (dynamika i chemizm) oraz intensywności działania czynników abiotycznych (geologicznych, hydrologicznych, klimatycznych), ekologicznych i antropogenicznych.

Trwale działającym procesem, choć w naszych warunkach klimatycznych powolnym i w czasie jednego pokolenia trudno dostrzegalnym (dla obiektów zabytkowych, mimo braku oceny stanu wyjściowego, mogą być to już zmiany o dużej istotności dla stateczności i trwałości obiektu) jest wietrzenie. Jest to proces dezintegracji fizycznej i chemicznej (także biochemicznej) skał i gruntów pod wpływem czynników zewnętrznych. Fizycznymi czynnikami wietrzenia jest termiczne kruszenie szkieletu gruntowego (zmiany temperatury, działanie lodu), wilgotnościowe pęcznienie i skurcz, erozja i sufozja związana z ruchem wody, mechaniczne (niszczące) działanie korzeni roślin.

Chemiczne procesy wietrzenia związane z oddziaływaniem wody (dysocjacja i hydroлиза, rozpuszczanie, krystalizacja, sufozja chemiczna), powietrza (utlenienie, redukcja, karbonatyzacja), transformacji minerałów ilastych oraz biochemicznych (humifikacja, nityfikacja).

Bardziej spektakularnymi i dostrzegalnymi często w formie katastrof budowlanych są dynamiczne procesy związane z wysokoenergetycznymi przepływami wód, trzęsieniami ziemi, ruchami masowymi, czy też szkodami górniczymi lub wibracyjnym oddziaływaniem szlaków komunikacyjnych.

Dla istniejących (ale także w formie prognozy dla projektowanych) obiektów budowlanych istotne znaczenie ma boczna erozja cieków wodnych oraz erozja brzegowa akwenów i zbiorników wodnych (abrazja). Stałe, lub dynamiczne krótkotrwałe oddziaływanie wody płynącej lub falowania powoduje podcinanie zboczy, które tracą równowagę i ulegają obrywaniu bądź osuwaniu, zmieniając strefę krawędziową i stwarzając zagrożenie dla obiektów budowlanych.

Do powierzchniowych ruchów masowych, gwałtownych procesów geodynamicznych związanych z naruszeniem stanu równowagi w wyniku oddziaływania czynników geologicznych wewnętrznych (sejsmika), wilgotnościowych (zmiana gęstości i konsystencji ośrodka gruntowego) lub antropogenicznych (szkody górnicze, podcinanie skarp, napełnianie zbiorników zaporowych) zalicza się spływy, zsuwy (osuwiska) i obrywy. Procesy te związane są z naruszeniem stateczności zboczy.

Spływy (a także spełyzywania) następują po nasyceniu warstw przypowierzchniowych (zwłaszcza zwietrzelin i deluwiiów stokowych), zmieniających grunty spoiste lub drobnoziarniste niespoiste (pyły, piaski pylaste) w półpłynną masę, która (utrata tarcia wewnętrznego i spójności) spływa po nawet stosunkowo mało nachylnym zboczu. Proces ten może zaistnieć także w gruntach mniej nasyconych wodą ale wykazujących właściwości tiksotropowe (gliny pylaste, pyły) i poddanych sejsmicznym lub antropogenicznym wibracjom. Procesy te także dość często zachodzą w warunkach głębokiego zamrożenia podłoża gruntowego i wiosennego, powierzchniowego rozmrażenia. Granica tych dwóch odmiennych ośrodków (różnica konsystencji i wytrzymałości) tworzy powierzchnię poślizgu.

Zsuwy (osuwiska w węższym znaczeniu) mają złożoną genezę zależną od rodzaju gruntów, układu i geometrii gruntów, warunków wodnych, morfologii, działania czynników zewnętrznych, w tym antropogenicznych. Niejednokrotnie nawet niewielka zmiana jednego z tych elementów może doprowadzić do zaburzenia istniejącej równowagi i przemieszczenia mas gruntu. Są to procesy z reguły przebiegające szybko (sezon-dwa), lecz mogą one trwać całymi latami, co pozwala na podejmowanie działań ratunkowych.

Osuwiska stanowią zagrożenie dla obiektów budowlanych w strefach krawędziowych (redukcja morfologii i rozluźnienie, awarie i katastrofy obiektów budowlanych), na zboczu (powstawanie niszy osuwiskowej, przemieszczanie obiektów budowlanych),

u podstawy (masy gruntowe jęzora osuwiskowego lub wypieranie i przemieszczanie podłoża gruntowego).

Obrywy są procesami gwałtowniejszymi od osuwisk. Związane są z oderwaniem fragmentu mas gruntowych (skalnych) i przemieszczeniem w dół ze znaczną prędkością. Powstają w warunkach ostro zarysowanych zboczy, o dużym kącie nachylenia w warunkach naturalnego (wody powierzchniowe) lub sztucznego podcięcia zboczy, a także przeciążenia części krawędziowej zbocza lub odspojenia w wyniku oddziaływań sejsmicznych.

W rejonach występowania skalistych gruntów węglanowych (wapienie, marmury, dolomity) a także gipsów, częstym zjawiskiem są procesy krasowe. Formy krasowe mogą tworzyć w podłożu budowlanym puste przestrzenie osłabiające górotwór i w swoim ostatecznym rozwoju, bądź pod dodatkowym obciążeniem ulegają zniszczeniu, stwarzając zagrożenia budowlane, najczęściej o charakterze katastrofalnym (zapadliska).

Formy krasu powierzchniowego tworzą bardzo niejednorodne podłoże gruntowe o silnej anizotropii ściśliwości, od nieściśliwych litych skał węglanowych do nieskonsolidowanych lub luźnych gruntów wypełniających kieszenie i leje krasowe.

Duże różnice osiadań prowadzą najczęściej do sytuacji awaryjnych obiektu budowlanego. Podłoża budowlane tego rodzaju są bardzo trudne do diagnozowania klasycznymi metodami badawczymi.

3.1.6. Metody badań geotechnicznych

Badania terenowe stanowią podstawę do scharakteryzowania warunków występujących w podłożu obiektu oraz utworzenia modelu geologicznego i wydzielenia warstw gruntów i skał oraz ich charakterystyki geotechnicznej. Norma PN-EN 1997-2 zaleca wykonywanie badań polowych (terenowych) na każdym etapie badań podłoża budowlanego. Norma ta szczegółowo wymaganiami i zaleceniami metodycznymi:

- kartowanie geologiczno-inżynierskie w ramach wizji lokalnej;
- wiercenia z poborem prób gruntów, skał i wody gruntowej;
- badania hydrogeologiczne (pomiaru statyki i dynamiki poziomów wodonośnych);
- sondowania gruntów i skał.

Ponadto w zależności od celu, szczególnie dla obiektów zabytkowych powinno wykonywać się pomiary geodezyjne, teledetekcyjne, geofizyczne i środowiskowe. W ramach dobrych praktyk stosowanie norm PN-EN 1997-1 i PN-EN 1997-2 wraz z dokumentami powiązаныmi.

Celem kartowania geologiczno-inżynierskiego jest weryfikacja materiałów archiwalnych, wstępna charakterystyka geomorfologiczna i gruntów występujących powierzchniowo, identyfikacja procesów geodynamicznych oraz stanu obiektów budowlanych (odkształcenia, pęknięcia, rysy, zawilgocenia), lokalizacja obszarów szkód budowlanych i górniczych, lokalizacja podtopień i granic zasięgu wód wysokich (w tym wody 100- i 500-letniej na podstawie map projektu Informatyczny System Osłony Kraju), weryfikacja możliwości wykonania planowanych badań.

Zgodnie z normą PN-EN 1997-2 metodę wiercenia należy dobrać zgodnie z wymaganymi rodzajami pobieranych próbek, projektowaną głębokością wiercenia, spodziewanymi warunkami gruntowo-wodnymi, projektowanymi badaniami dodatkowymi (laboratoryjnymi, geofizycznymi, sondowaniami), lokalizacją wiercenia. Norma ta zaleca stosowanie technik wiercenia ujętych w normie PN-EN ISO 22475-1. Do opisu i charakteryzowania gruntów norma PN-EN 1997-2 zaleca stosowanie normy PN-EN ISO 14688- wraz z poprawkami i zmianami. W Polsce do diagnozowania gruntów wciąż stosowana jest norma PN-B-04448.

Badania hydrogeologiczne w świetle Eurokodu 7 wykonuje się celem określenia głębokości i charakteru występowania poziomów wodonośnych i kierunków ich przepływów, określenia agresywności wód, ilościowego określenia parametrów filtracyjnych gruntów i skał. Wyniki tych badań należy uwzględnić w badaniach geotechnicznych i obliczeniach projektowych.

Znormalizowane i zalecane sondowania gruntów i skał ujęte są w normie PN-EN 1997-2. Szczególnie przydatne i zalecane są sondowania statyczną sondą stożkową CPT i CPTU. Wyniki badań tymi sondami wykorzystywane są do uszczegółowiania granic geologicznych, zagęszczenia gruntów gruboziarnistych i stanu gruntów drobnoziarnistych, wyznaczania stref osłabienia, zasięgu występowania gruntów organicznych, podatności podłoża na deformacje filtracyjne, oceny sztywności i ścisłości podłoża oraz wstępnej prognozy osiadań.

Do pomiarów in situ odkształcalności i wstępnej prognozy osiadań gruntu lub miękkiej skały stosuje się zgodnie z normą PN-EN 1997-2 badania presjometryczne PMT. Badania te są szczególnie przydatne do gruntów słabych, z ograniczeniami metodę można stosować do wstępnej oceny ekspansywności i właściwości wytrzymałościowych gruntu.

W badaniach geotechnicznych podłoży obiektów zabytkowych można wykorzystać sondę wkręcaną WST, która pozwala (zgodnie z normą PN-EN 1997-2) na ustalanie następstwa warstw, ciągłego profilowania wytrzymałości gruntu oraz stopnia zagęszczenia gruntów gruboziarnistych i stanu gruntów drobnoziarnistych.

Mniej przydatne, z uwagi na sejsmiczne oddziaływania, jest stosowanie przy obiektach zabytkowych sondowań dynamicznych DP oraz metod dylatometrycznych w związku z ich małą popularnością w Polsce i braku sprawdzonych lokalnych korelacji.

Badania geofizyczne, które ze względu na swoją nieinwazyjność, wydają się być właściwe dla rejonów objętych ochroną konserwatorską, przez normę PN-EN 1997-2 wymieniane są jako badania, które wśród innych informacji mogą być wykorzystane do ogólnego programu badań geologiczno-inżynierskich lub badań podłoża gruntowego. Szczególnie przydatne wydają się powierzchniowe badania geofizyczne elektrooporowe, georadarowe i grawimetryczne. Metody te pozwalają na wstępną charakterystykę podłoża (uwarstwienie, rodzaj gruntu, wstępne określenie właściwości wytrzymałościowych, rejestracja nieciągłości i pustych przestrzeni w podłożu, itp.). Na etapie projektu

metody te pozwalają na uszczegółowienie modelu budowy geologicznej i właściwości wydzielonych warstw uzyskanych innymi metodami.

W wielkoobszarowych badaniach geologiczno-inżynierskich bardzo przydatnymi są metody teledetekcyjne (satelitarne, lotnicze i naziemne) oraz fotogrametryczne (nie uwzględniane w Eurokodzie 7). Są to metody szczególnie przydatne do analizy terenów osuwiskowych, osiadania gruntów i innych procesów przyrodniczych i antropogenicznych, które powodują deformacje powierzchni terenu.

3.1.7. Geoinżynieria w utrzymaniu obiektów zabytkowych

O potrzebie i sposobach likwidacji przyczyn destrukcyjnych oddziaływań środowiska gruntowo-wodnego i ekologicznego na obiekt zabytkowy oraz/lub potencjalnego wzmocnienia jego posadowienia decydują wnioski wynikające z dokumentacji geologiczno-inżynierskiej i ustaleń geotechnicznych oraz coraz częściej także z raportu oddziaływania przedsięwzięcia (remontu, modernizacji, rewaloryzacji) na środowisko.

Niejednokrotnie wystarczy usunąć tylko przyczynę, naturalną lub antropogeniczną, aby proces destrukcji obiektu spowolnić lub zlikwidować, jednak najczęściej podejmuje się także równoczesne działania zabezpieczające i wzmacniające konstrukcje obiektu. Podejmowane rozwiązania są indywidualne dla każdej lokalizacji z racji indywidualnych rozwiązań obiektu (obiektów, zespołu) oraz specyfiki podłoża gruntowo-wodnego i środowiska otaczającego obiekt.

Potencjalne działania geoinżynierskie rewaloryzujące współpracę obiektu lub zespołu zabytkowego z podłożem gruntowo-wodnym mają z reguły na celu:

- zwiększenie nośności,
- redukcję osiadań (a także wysadzinowości),
- obniżenie poziomu wód gruntowych,
- zmniejszenie przepuszczalności hydraulicznej,
- wyeliminowanie lub zredukowanie zjawisk szkodliwych (geodynamicznych),
- likwidację naturalnych nieciągłości i pustek oraz wyrobisk podziemnych,
- stabilizację skarp i zboczy.

Większość z przedstawionych celów można osiągnąć poprzez rozwiązanie warunków zasilania i przepływu wód powierzchniowych i gruntowych oraz regulację wilgotności gruntów, która ma decydujący wpływ na ich parametry mechaniczne. Redukuje się lub likwiduje infiltrację wód opadowych i roztopowych w ramach uszczelnienia powierzchni lub odprowadzania ich poza zasięg bezpośredniego oddziaływania (kanalizacja). Płytkie poziomy wodonośne likwiduje się lub obniża w ramach powierzchniowego lub podziemnego drenażu (melioracje) lub odcina się ich wpływ, bądź zmienia się ich przepływy poprzez wykonywanie kierunkowych ścianek szczelnych (na kierunku napływu). Mało wydajne poziomy lub nadmierne uwilgotnienie można likwidować za pomocą drenów piaskowych (ew. drenów sztucznych, tzw. geodrenów), elektroosmozy lub też w ramach fitomelioracji (rozwiązania biocenotyczne).

Wzmocnienie i uszczelnienie podłoża gruntowego lub skalnego można uzyskać poprzez cementację i stabilizację. Najczęściej stosuje się zaczyny i zaprawy cementowe oraz dodatki chemiczne (żywice, szkło wodne, żele krzemianowe), mogą być stosowane także (tam gdzie chcemy uzyskać szczelność bez wzrostu wytrzymałości) zawiesiny gruntowe (iłowe). Dobór metody i środka zależy głównie od porowatości (szczelinowatości), czyli rodzaju gruntu.

Likwidacje naturalnych (np. krasowych) lub antropogenicznych (piwnice, tunele) pustek w podłożu gruntowym zagrażających obiektom powierzchniowym wykonuje się klasycznymi metodami górniczymi (podsadzka, obudowa) lub w przypadku obiektów mniejszych, iniekcjami pasywnymi (gruntowe) lub aktywnymi (cementowe, cementowo-piaskowe).

Stabilizację skarp i zboczy uzyskuje się poprzez likwidację naturalnych lub wzbudzonych procesów geodynamicznych, których głównymi przyczynami są warunki wodne (powierzchniowe i gruntowe), wilgotnościowe oraz oddziaływania dynamiczne, najczęściej antropogeniczne. Likwidacja przyczyn z reguły stabilizuje lub spowalnia procesy osuwiskowe skarp i zboczy, skutki stabilizuje się rozwiązaniami biotechnicznymi (obsew, darniowanie, sadzanie krzewów i drzew) lub geotechnicznymi (zmiana geometrii, geotekstyli, geokraty, gabiony, mury oporowe).

3.2. Badania elementów konstrukcji

W celu określenia stanu technicznego oraz nośności i wytrzymałości elementów konstrukcji należy przeprowadzić szereg badań. Na ich podstawie możliwym będzie wyznaczenie parametrów decydujących o kondycji samej konstrukcji. Badania dzielimy na dwie główne grupy: badania pośrednie i badania bezpośrednie.

Badania pośrednie to taki typ badań, w których wyznaczania poszukiwanych parametrów wykonuje się na podstawie zależności tych parametrów z innymi parametrami materiału (np. wyznaczanie wytrzymałości na ściskanie materiału na podstawie twardości powierzchniowej zbadanej metodą sklerometryczną). Badania bezpośrednie to badania, w których od razu wyznaczamy poszukiwany parametr (np. wyznaczenie wytrzymałości na ściskanie przez ściśnięcie próbki na prasie hydraulicznej).

Dodatkowo badania dzielimy na: badania *in situ* oraz badania laboratoryjne:

- na *in situ* to badania, które wykonywane są na obiekcie a wynik znany jest już w momencie prowadzenia badania;
- wymagają pobrania próbki laboratoryjnej i wyznaczenia parametrów na sprzęcie laboratoryjnym.

W celu określenia nośności elementów konstrukcji wykorzystywane są również modele komputerowe i analizy numeryczne. Zastosowanie odpowiednich algorytmów obliczeniowych daje możliwość szacowania wytrzymałości elementów konstrukcji. Aby wykonać taki model należy jednak wcześniej znać parametry materiałowe budulca konstrukcji.

Przed przystąpieniem do badań z użyciem specjalistycznego sprzętu powinna zostać wykonana ocena makroskopowa poszczególnych elementów ruiny. Rozpoznanie materiałów i uszkodzeń podczas wizji lokalnej pozwoli doprecyzować zakres niezbędnych testów i analiz. Dzięki temu specjaliści podejmujący zagadnienia oceny i badań konstrukcji, korzystając z aparatury badawczej będą w stanie potwierdzić swoje tezy lub też opracować nowe.

3.2.1. Badanie endoskopowe

Badanie inspekcyjne przy użyciu kamery endoskopowej jest badaniem całkowicie nie niszczącym. Badanie może mieć charakter quasi – niszczący w przypadku konieczności wykonania otworu badawczego, do którego wprowadzona zostanie kamera.

Badanie endoskopowe polega na wykonaniu oględzin trudnodostępnych miejsc. W zależności od użytego endoskopu średnica kamery wynosi od 5 do nawet 30 mm. Kamera zamocowana jest na końcu elastycznego przewodu. Długość przewodu jest zróżnicowana w zależności od typu kamery. Dzięki znacznej elastyczności oraz długości przewodu istnieje możliwość umieszczenia kamery z podświetleniem zarówno w trudno dostępnych miejscach jak i samej strukturze materiału. Cały obraz z kamery na bieżąco pojawia się na wyświetlaczu LCD zamontowanym przy uchwycie. W większości kamer istnieje możliwość rejestracji obrazu oraz zrobienia zdjęcia. W celu zwiększenia precyzji badań zaleca się stosowanie kamer o dużych rozdzielczościach.

Dzięki badaniom inspekcyjnym możemy określić między innymi:

- co znajduje się w miejscach trudnodostępnych, nie możliwych do wykonania oględzin bez wcześniejszego wykonania otworu rewizyjnego;
- układ warstw przegrody – wykonując otwór badawczy na całej grubości przegrody istnieje możliwość rejestrowania na bieżąco zmieniających się warstw materiałów podczas wkładania lub wyciągania elastycznego przewodu z kamerą;
- rodzaju użytych materiałów;
- jednorodności materiałów;
- wad wewnętrznych materiałów – w przypadku podejrzenia uszkodzenia struktury wewnętrznej materiału, po wykonaniu otworu badawczego istnieje możliwość inspekcji fragmentu znajdującego się w strukturze.



Fot. 5 Kamera endoskopowa

3.2.2. Badanie ultradźwiękowe

Podstawowym urządzeniem do wykonywania tych badań jest defektoskop ultradźwiękowy – rodzaj urządzenia, które służy do określania właściwości przez pomiar prędkości rozchodzenia się w materiale fali ultradźwiękowej. Podczas badań wykorzystuje się ultradźwięki o częstotliwościach np. 24 kHz, 37 kHz, 54 kHz (jako typowych), oraz 82 kHz i 150 kHz.

Badanie jest badaniem specjalistycznym. Technologia wykonania badania jest zróżnicowana i zależy od celu jakiego badanie ma służyć. Różne częstotliwości badania oraz umiejscowienia sond badawczych dają możliwości określenia innych parametrów badanego materiału.

Dzięki badaniom ultradźwiękowym możemy określić między innymi:

- gęstość badanego materiału,
- jednorodność badanej przegrody,
- geometrię badanej przegrody (określenie grubości przegrody przy dostępie jednostronnym),
- wady materiałowe (wraz z ich umiejscowieniem oraz wielkością).



Fot. 6 Sprzęt do badania ultradźwiękowego

3.2.3. Badanie młoteczkowe

Metoda podobnie jak metoda ultradźwiękowa bazuje na zjawisku rozchodzenia się w badanych elementach fal akustycznych, z tą różnicą, że wzbudzone są w sposób mechaniczny. Sposób detekcji uszkodzeń lub defektów opiera się na metodzie echa (odbite fale od wad w strukturze materiału są rejestrowane i przetwarzane).

Mechaniczne wzbudzenia uzyskiwane są poprzez uderzenie małej stalowej kulki o powierzchnię badanego elementu. Uderzenie generuje fale akustyczne. Fale te rozchodzą się wewnątrz struktury materiału i ulegają odbiciu od wewnętrznych wad lub jego zewnętrznej powierzchni. Przemieszczenia elementu spowodowane powrotem fal odbitych rejestrowane są przez czujnik piezoelektryczny znajdujący się w bliskim sąsiedztwie wzbudnika. Uzyskane wartości przemieszczeń w funkcji czasu podawane są transformacji do spektrum częstotliwości i przedstawiane w formie wykresu. Wielokrotne odbicia drgań od powierzchni i wad wewnątrz prowadzą do powstania amplitudy drgań, którą można zidentyfikować na wykresie spektrum częstotliwościowego. Wykres ten ulegają zmianie w przypadku istnienia jakichkolwiek zaburzeń struktury elementu i dostarczają informację o ich położeniu.

Poniżej przedstawiono schemat badania. Fale odbite na skutek wad w materiale przetwarzane są w systemie komputerowym a następnie przedstawiane w postaci wykresu drgań oraz spektrum drgań. Te dwa wykresy są podstawą do dalszych analiz.

Dzięki badaniom młoteczkowym możemy określić między innymi:

- pęknięcia, rozwarstwienia czy pustki powietrzne w materiale,
- jednorodność badanej przegrody,
- geometrię badanej przegrody (określenie grubości przegrody przy dostępie jednostronnym),
- wady materiałowe (wraz z ich umiejscowieniem oraz wielkością).

3.2.4. Badanie elektromagnetyczne

Urządzenie przeznaczone jest głównie do wykrywania zbrojenia w elementach konstrukcji żelbetowych, jednak znajduje swoje zastosowanie również w zabytkach.



Fot. 7 Urządzenie do badania elektromagnetycznego

W obiektach historycznych ruin urządzenie elektromagnetyczne pomocne jest w poszukiwaniu fragmentów dawnych elementów stalowych często kotwionych w murze (np. okucia, zawiasy, uchwyty, fragmenty bram i krat, itp.).

3.2.5. Badanie sklerometryczne

Metoda badania przy użyciu młotka Schmitda jest metodą sklerometryczną, która opiera się na zależności między powierzchnią twardością materiału a jego wytrzymałością na ściskanie. PN-EN 12504-2:2013-03 „Badania betonu w konstrukcjach – Część 2: Badanie nieniszczące – Oznaczanie liczby odbicia”.

Sklerometr głównie stosuje się w konstrukcjach betonowych jednak znajduje on swoje zastosowanie również w elementach wykonanych z innych materiałów.

Młotek Schmitda jest przyrządem umożliwiającym ocenę powierzchniowej twardości betonu na podstawie pomiaru odskoku od powierzchni masy trzpienia z układem sprężynowym uderzającego z określoną siłą. Wartością mierzoną jest tzw. liczba odbicia (L), którą odczytuje się na skali młotka.

Rozróżnia się 4 typy młotków Schmitda, różniące się energią uderzenia: N – średni (normalny), L – lekki, M – ciężki (masywny), P – wahadłowy.

Przeprowadzenie badania :

- młotek ustawić prostopadle do badanej powierzchni i powoli naciskać;
- nacisk powoduje cofnięcie się masy uderzeniowej i naciągnięcie sprężyny uderzeniowej (cofnięcie się masy powoduje automatyczne zwolnienie i uderzenie w trzpień, zaś po uderzeniu masa odskakuje na pewien odcinek, rejestrowany za pomocą wskaźnika);
- odczyt na skali – liczba odbicia L;
- dla wszystkich typów młotków zasady pomiarów są identyczne.

Liczba miejsc badań:

- badanie przeprowadzać co najmniej w 12 miejscach w jednym elemencie,
- w badanym miejscu należy wykonać przynajmniej 5 odczytów.

Miejsca gdzie wyniki mogą być niemiernodajne:

- w odległości mniejszej niż 3–4 cm od krawędzi elementu,
- powierzchni skorodowanych,
- elementów o małej sztywności,
- powierzchni zawilgoconych (zaniżone odczyty).

Interpretacja wyników

Na podstawie badań uzyskuje się wartość tzw. liczby odbicia L, którą odczytuje się bezpośrednio ze skali młotka. Następnie na podstawie liczby odbicia oraz krzywych regresji wyznaczonych indywidualnie dla każdego materiału jest możliwość szacowania wytrzymałości na ściskanie danego elementu.

Wzór na wyznaczenie wytrzymałości na ściskanie R :

$$R = aL^2 + bL + c$$

gdzie:

R – wytrzymałość na ściskanie [MPa],

L – liczba odbicia na podstawie średniej arytmetycznej z 12 miejsc badań,

a, b, c – parametry określone na podstawie krzywej regresji, opracowanej indywidualnie i doświadczalnie dla każdego materiału

Dzięki badaniom sklerometrycznym możemy określić między innymi:

- twardość powierzchniową badanego elementu,
- wytrzymałość na ściskanie oraz rozciąganie na podstawie jej relacji z twardością powierzchniową,
- jednorodność badanych elementów,
- przyczepność warstw wykończeniowych (przyczepność tynków do elementu konstrukcji),
- występowanie lokalnych wad, nieciągłości lub zaburzeń struktury elementu.



Fot. 8 Widok podczas padania sklerometrycznego

3.2.6. Badanie wytrzymałości na odrywanie (PULL-OFF)

W obiektach istniejących często spotykanym zjawiskiem jest odpajanie się warstw wykończenia. Może to świadczyć zarówno o uszkodzeniu warstwy wykończeniowej jak

i uszkodzeniu podłoża bądź też warstwy stykowej. W celu określenia parametru przyczepności wykonuje się badanie wytrzymałości na odrywanie PULL-OFF. Wytrzymałość samego podłoża istotna jest podczas projektowania warstw odtworzeniowych, nowych lub naprawczych.

Dodatkowo badanie PULL-OFF stosowane jest również jako metoda pośredniego określania innych parametrów badanego materiału.

Celem badania jest określenie przyczepności warstw wykończeniowych do podłoża lub wytrzymałości samego podłoża na odrywanie. Na podstawie wyników wytrzymałości na odrywanie istnieje możliwość szacowania innych parametrów materiałów (wykorzystanie badania jako badania pośredniego).

Badanie wytrzymałości na odrywanie normowo opisane jest w *PN-EN 1542:2000 – Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych – Metody badań – Pomiar przyczepności przez odrywanie* oraz *PN-EN 1015-12:2016-08 Metody badań zapraw do murów – Część 12: Określenie przyczepności do podłoża stwardniałych zapraw do tynkowania zewnętrznego i wewnętrznego*. Z uwagi na nietypowy charakter obiektów obie te normy znajdują zastosowanie w badaniu. Normę PN-EN 1542:2000 zaleca się do stosowania parametru przyczepności samego podłoża natomiast PN-EN 1015-12:2016-08 do badania przyczepności tynku do podłoża.

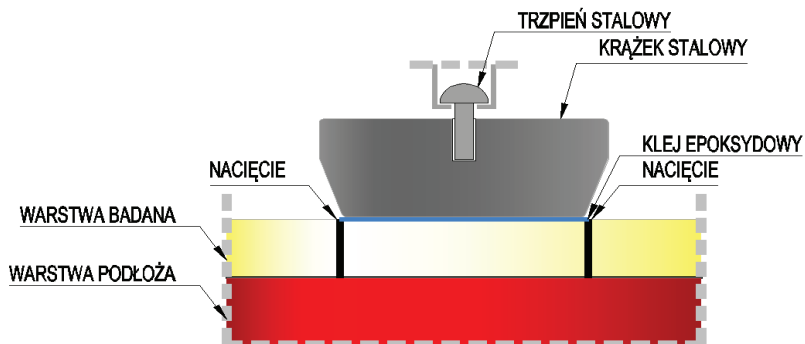
Metodyka badania w obu normach jest bardzo do siebie zbliżona.

Przygotowanie badania

Przed przystąpieniem do badania wytrzymałości na odrywanie należy odpowiednio przygotować podłoże. Pierwszym krokiem podczas przygotowania podłoża powinno być jego oczyszczenie, odłuszczenie oraz w przypadku znacznych nierówności zeszlifowanie. Jeżeli badany jest parametr przyczepności samego podłoża lub innej warstwy niż warstwa wierzchnia należy odsłonić ten materiał i na nim prowadzić pracę przygotowawczą.

Po takim przygotowaniu warstwy należy przy użyciu korony diamentowej naciąć badany element średnicą wewnętrzną koronki równą 50 mm. Głębokość nacięcia jest bardzo istotna podczas samego badania. W przypadku warstw wykończeniowych zaleca się nacięcie przez całą grubość warstwy (w przypadku tynków zgodnie z PN-EN 1015-12:2016-08 dopuszcza się 2 mm nacięcia). W przypadku warstw konstrukcyjnych zaleca się nacięcie na głębokość nie mniejszą niż 10 mm. Głębokość nacięcia może wpłynąć na wyniki pomiaru, dlatego aby porównać wyniki z różnych próbek badanie powinno być przygotowane w ten sam sposób.

Następnie krążki o wymiarach zgodnych z normami należy przytwierdzić do badanego podłoża przy pomocy żywicy epoksydowej. Należy nie dopuścić do rozlania się kleju poza obszar badania, może to powodować zaburzone wyniki pomiarów. Żywica musi mieć wytrzymałość na rozciąganie większą niż zakładana wytrzymałość badanego podłoża na odrywanie. Czas twardnienia żywicy, sposób nakładania oraz warunki twardnienia zgodnie z zaleceniami producenta.



Rys. 7 Schemat badania PULL-OFF

Przeprowadzenie badania

Po stwardnieniu kleju w miejscu do tego przeznaczonym na stalowym krążku należy umieścić stalowy trzpień. Następnie zgodnie z zaleceniami norm badanie wykonywać z siłą wzrastającą o 10 N, co 1 sekundę. Badanie przeprowadza się do momentu aż próbka zostanie oderwana od podłoża.



Fot. 9 Zdjęcie podczas badania



Fot. 10 Zdjęcie krążka oraz miejsca po badaniu

Określenie parametru przyczepności

Przyczepność zaprawy f_h wyrażoną w MPa wylicza się stosując wzór:

$$f_h = \frac{4F_h}{\pi D^2}$$

gdzie:

f_h – przyczepność badanej próbki w MPa (megapaskalach)

F_h – obciążenie przy zniszczeniu w N (niutonach)

D – średnica próbki w mm (milimetrach)

Dokładność obliczeń do 0,1 MPa.

Następnie należy oznaczyć przyczepność średnią co najmniej trzech miarodajnych wyników badania (przy standardowym zniszczeniu). Jeśli występują liczne zniszczenia niestandardowe badanie należy powtórzyć aż do uzyskania zamierzonej liczby wyników.

Określenie typu zniszczenia próbki

Typ zniszczenia próbki należy określić wizualnie. Możliwe są następujące typy zniszczenia:

- A – zniszczenie kohezyjne w warstwie podłoża,
- B – zniszczenie kohezyjne w warstwie badanej,
- Y – zniszczenie kohezyjne w warstwie kleju,
- A/Y lub B/Y oznacza zniszczenie pomiędzy warstwą podłoża i kleju lub warstwą badaną i kleju,
- A/Z oznacza zniszczenie pomiędzy warstwą kleju a krążka.

Sprawozdanie z badania

Sprawozdanie z badania powinno zawierać następujące informacje:

- datę i miejsce pobrania badania;
 - dane identyfikacyjne dotyczące badanego materiału (rodzaj, grubość warstwy);
 - metody przygotowania podłoża;
 - średnicę, grubość i rodzaj materiału, z którego wykonano krążki;
 - rodzaj kleju użyty w badaniu;
 - charakterystyka przyrządu służącego do odrywania z wymienieniem producenta, typu, maksymalnej siły odrywającej i zakresu pomiarowego;
 - obciążenie przy zniszczeniu i średni wymiar średnicy dla każdego miejsca badania;
 - wyniki poszczególnych badań przyczepności oraz wartości średnie;
 - typ zniszczenia w każdym miejscu badania;
 - wszelkie nieprawidłowości i inne uwagi zanotowane podczas badania.
- Dzięki badaniom PULL-OFF możemy określić między innymi:
- przyczepność pomiędzy materiałami (np. tynki i ścianą murowaną),
 - wytrzymałość podłoża na odrywanie,
 - szacowanie wytrzymałości na ściskanie oraz rozciąganie elementu (na podstawie relacji wytrzymałości na odrywanie i innych parametrów fizycznych),
 - występowanie lokalnych wad struktury elementu.

3.2.7. Badanie termowizyjne

Termowizja jest metodą diagnostyczną polegającą na detekcji promieniowania w paśmie podczerwieni i zamianie tegoż promieniowania na obraz widzialny. Dzięki temu możemy obserwować i oceniać rozkład temperatur oraz ich wartości na zewnętrznej powierzchni badanego obiektu. Tworzenie obrazu polega na rejestracji przez kamerę promieniowania emitowanego przez obserwowany obiekt, a następnie przetworzeniu na kolorową mapę temperatur. Tak powstała mapa jest następnie interpretowana graficznie, gdzie każdej temperaturze przypisywana jest inna barwa lub odcień szarości, dzięki czemu w wizjerze lub w komputerze widziany jest termalny obraz obiektu.

W obiektach w ruinie kamera termowizyjna znajduje swoje zastosowanie do rozpoznawania różnych elementów. Z uwagi na zjawisko akumulacyjności cieplnej, materiały o różnych gęstościach uzyskiwać będą różne temperatury. Może dojść do sytuacji, w której materiały uzyskały równowagę temperatury z otoczeniem i nie zależnie od swojej gęstości wykazywać będą taką samą temperaturę powierzchniową. Tedy badanie należy rozszerzyć do termowizji aktywnej. Termowizja aktywna polega na chwilowym ogrzaniu lub wyziębieniu badanego fragmentu elementu. Z uwagi na różnice w budowie fizycznej materiałów, w różnym tempie będą one się wygrzewać lub ochładzać. Obserwując w czasie rzeczywistym zmiany temperatury badanego fragmentu spowodowane zewnętrznym czynnikiem podwyższonej lub obniżonej temperatury istnieje możliwość identyfikacji elementów. Podczas wykonywania termowizji aktywnej należy uwzględnić wpływ szoku termicznego na badane elementy. Temperaturę badania należy dobrać w taki sposób aby nie doprowadzić do zniszczenia badanego obiektu.



Fot. 11 Kamera termowizyjna podczas badania

Zalety badania kamerą termowizyjną:

- termografia podczerwieni jest metodą badań nieniszczącą i bezkontaktową,
- promieniowanie jest bezpieczne dla ludzi i otoczenia,
- szeroki zakres zastosowań oraz szeroki zakres mierzonych temperatur,
- pomiar dokonywany jest w czasie rzeczywistym,
- umożliwia skuteczny pomiar temperatury panującej na powierzchni obiektów trudnodostępnych.

Ograniczenia podczas badania:

- wysoki koszt aparatury (w przypadku termowizji aktywnej dodatkowy koszt układu stymulacji cieplnej);
- między kamerą podczerwieni, a powierzchnią badaną nie mogą znajdować się przeszkody;
- zjawiska konwekcji, promieniowania i przewodnictwa ciepła zakłócają pomiar;
- trudności otrzymania jednorodnego nagrzewania dużej powierzchni przy stosowaniu termowizji aktywnej podczerwieni;
- przy zastosowaniu aktywnej podczerwieni można wykryć defekty tylko w powierzchniowej warstwie materiału.

Dzięki badaniom termowizyjnym możemy określić między innymi:

- zróżnicowanie materiałowe ukryte pod warstwami wierzchnimi;
- wykrywanie w materiale wad, pustek powietrznych, nieciągłości;
- wykrywanie zawilgocenia.

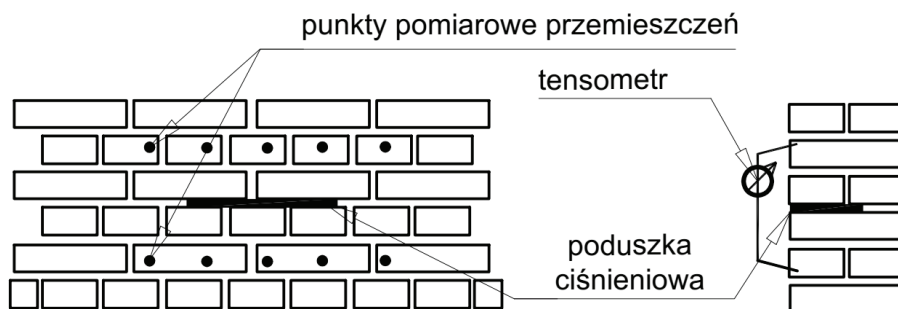
3.2.8. Badanie poduszkami ciśnieniowymi

Badanie z wykorzystaniem poduszek ciśnieniowych (flat jack) stanowi jedną z podstawowych metod ewaluacji istniejących konstrukcji murowych w krajach Europy Zachodniej, Południowej oraz w Stanach Zjednoczonych.

Poduszki ciśnieniowe wykorzystywane są do pomiarów dwojakiego rodzaju:

- pomiar naprężeń w murze za pomocą pojedynczej poduszki ciśnieniowej,
- pomiar odkształcalności muru i ewentualnie jego wytrzymałości za pomocą dwóch poduszek ciśnieniowych.

Metoda wyznaczenia naprężeń w murze metodą poduszek ciśnieniowych jest bardzo prosta. Pierwszym krokiem jest odpowiednie rozmieszczenie punktów kontrolnych i dokonanie pomiarów odległości pomiędzy nimi (z dokładnością do 0,001). Następnie należy pomiędzy punktami pomiarowymi wykonać bruzdę (przez wykucie lub nacięcie), w której umieszcza się poduszkę ciśnieniową. Poduszka ciśnieniowa wykonana jest z blachy a jej kształt zależy od kształtu wykonanego bruzdowania. Następnie poduszka wypełniana jest cieczą a naprężenia spowodowane wypełnianiem poduszki oraz zwiększaniu jej objętości w powierzchni muru są na bieżąco monitorowane przy pomocy manometru. Na bieżąco wykonywane są pomiary pomiędzy punktami kontrolnymi. W momencie zrównania się wartości odległości z przed wykonania bruzdy wartość manometru należy odczytać. Po odpowiednim zredukowaniu wartości zależnym od kształtu poduszki oraz powierzchni docisku tej poduszki otrzymana wartość to wartość naprężeń w murze. Na podstawie analizy literatury technicznej błąd pomiarów oszacowano na poziomie nie większym niż 33%.



Rys. 8 Pomiar naprężeń w murze za pomocą pojedynczej poduszki ciśnieniowej

Na podstawie pomiarów określamy naprężenia w murze za pomocą zależności:

$$f_m = QK_m K_a$$

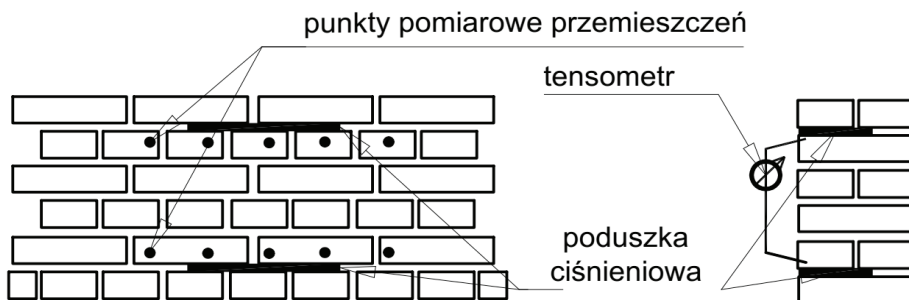
gdzie:

Q – ciśnienie w poduszce ciśnieniowej,

K_m – stała wzorcowania poduszek ciśnieniowych,

K_a – stosunek powierzchni poduszki ciśnieniowej od powierzchni otworu, w jakim została umieszczona.

Pomiar odkształcalności muru polega na wykonaniu dwóch bruzd i umocowaniu w nich poduszek. Pomiedzy wykonanymi bruzdami należy oznaczyć punkty kontrolne i dokonać na nich pomiarów odległości. Wyznaczenie odkształcalności muru polega na opisanu relacji przyrostu naprężeń do przyrostu odkształceń (moduł Younga) w konstrukcji murowej.



Rys. 9 Pomiar odkształcalności muru i ewentualnie jego wytrzymałości za pomocą dwóch poduszek ciśnieniowych

Aby uzyskać wynik wytrzymałości muru na ściskanie należy wprowadzić w poduszki takie ciśnienie aby doprowadzić do lokalnego zniszczenia konstrukcji muru. Ciśnienie niszczące będzie graniczną wytrzymałością konstrukcji murowej. Zniszczenie jest odwracalne, a badanie staje się badaniem niszczącym.

$$E_t = \frac{\Delta f_m}{\Delta \varepsilon_m}$$

gdzie:

Δf_m – zmierzony przyrost naprężenia,

$\Delta \varepsilon_m$ – zmierzony przyrost odkształcenia.

Dzięki badaniom przy pomocy poduszek ciśnieniowych możemy określić między innymi:

- naprężenia w murze,
- wytrzymałość muru na ściskanie,
- podstawowe parametry muru takie jak moduł Younga czy Poissona.

3.2.9. Analizy komputerowe

W celu określenia nośności elementów konstrukcji, oprócz badań materiałowych wykonuje się również analizy komputerowe. Analizy komputerowe, w przypadku obiektów zabytkowych są bardzo skomplikowane i często obarczone jednak błędem. Wynika to między innymi z niejednorodności materiałowej przegród oraz brakiem możliwości wyznaczenia parametrów materiałowych niezbędnych w analizie (wytrzymałości na ściskanie, rozciąganie, modułów sprężystości itd.). Na podstawie takich analiz możliwym jest uzyskanie naprężeń w konstrukcji oraz oszacowanie jej nośności.

W obiektach historycznej ruiny analizy komputerowe wykonywane są dla elementów murowych oraz podłoża gruntowego. Podłoże gruntowe stanowi podłoże dla konstrukcji i w przypadku obiektów tylko tak się je analizuje. Analiza zjawisk zachodzących w gruntach jest bardzo szerokim oraz skomplikowanym pojęciem i wykonywana jest tylko w szczególnych przypadkach.

Zdecydowanie częściej wykonuje się analizy konstrukcji murowych. Konstrukcje murowe złożone są z materiału murowego oraz zaprawy. Sprawia to, że do analizy konstrukcji mur traktowany jest jako kompozyt. W zależności od stopnia skomplikowania przegrody oraz jej różnorodności wyniki końcowe obarczone są różnym błędem.

W przypadku analizowania konstrukcji metodami komputerowymi, najczęściej stosowaną metodą jest MES (Metoda Elementów Skończonych). W metodzie tej można wyróżnić dwa generalne podejścia obliczeniowe modelu murowego – jedno polegające na oddzielnym modelowaniu poszczególnych składników, drugie natomiast jako model muru z kompozytu (jeden materiał o zadanych parametrach, bez wyszczególnienia materiału murowego oraz zaprawy).

Pierwsza metoda, zwana również mikro-modelowaniem lub modelowaniem heterogenicznym wymaga znacznie większego uszczegółowienia modelu niż metoda druga. Należy ustalić moduł Younga (moduł sprężystości podłużnej) współczynnik Poissona i ewentualne charakterystyki nieliniowe dla elementów murowych oraz zaprawy. Ponadto należy odpowiednio zamodelować powierzchnię styku, która oddawać będzie łączenie elementu murowego i zaprawy. Mikro-modelowanie znajduje zastosowanie jedynie w przypadku nie dużych fragmentów murów.

Do modelowania całości konstrukcji zaleca się drugą metodę, zwaną makro-modelowaniem lub modelowaniem homogenicznym. Jest to metoda uproszczona i nie ma tutaj wyszczególnienia materiału murowego oraz zaprawy. Tego typu rozwiązania przyspieszają oraz upraszczają analizy jednak znacznie wpływają na jej szczegółowość.

Należy pamiętać, że podczas wykonywania analiz komputerowych należy dobierać na tyle optymalne modele aby były efektywne – uzyskanie wystarczającego wyniku analizy odbywało się w jak najkrótszym czasie.

3.3 Badania wilgotności metodami pośrednimi

Zawilgocenie w sposób zdecydowanie negatywny wpływa na stan techniczny materiałów i elementów budowli. Wilgoć zawarta w murach może być samodzielnym czynnikiem destrukcyjnym (pęcznienie materiałów, wymywanie substancji wiążących, szkody mrozowe itp.) oraz katalizatorem innych procesów niszczących (korozja solna, korozja biologiczna, rozwój roślinności itp.).

Diagnostyka stanu wilgotnościowego pozwala na określenie w jakim stanie obecnie znajdują się mury oraz jakich procesów można się spodziewać w najbliższym okresie. W podrozdziale niniejszym przedstawione zostały podstawowe i najbardziej popularne metody badań *in situ* (metody pośrednie) wilgotności masowej materiałów.

Pomiar bezpośredni (laboratoryjny) uważany jest, za jedyny miarodajny sposób pomiaru wilgoci. Badania wilgotności metodą laboratoryjną posiadają jednak szereg ograniczeń związanych przede wszystkim z: kosztami badań, czasem uzyskania wyników i koniecznością często dość głębokiej ingerencji w przegrodę lub badany element. W wielu przypadkach pobranie materiału do badań jest trudne lub wręcz niemożliwe (badania w obiektach zabytkowych, elementy konstrukcyjne więźb dachowych i stropów). Alternatywą w takich sytuacjach stają się pomiary z wykorzystaniem metod pośrednich badania wilgotności.

Pomiar pośredni jest pomiarem, którego wynik otrzymuje się na podstawie bezpośredniego pomiaru innych wielkości, opierając się na znanej zależności między tymi wielkościami a wielkością mierzoną. Podział metod pośrednich badania wilgotności materiałów przedstawia się następująco:

- Metody chemiczne: karbidowa, Karla-Fishera, papierków wskaźnikowych;
- Metody fizyczne: elektryczne (mikrofalowa, dielektryczna, opornościowa), nieelektryczne (ekstrakcyjna, jądrowe, jądrowego rezonansu magnetycznego, oparta na równowadze ciśnień cząstkowych pary, oparte na pomiarze właściwości cieplnych).

W badaniach *in situ* stosuje się w rzeczywistości jedynie kilka metod. Do najważniejszych należą: dielektryczna, opornościowa, mikrofalowa i karbidowa. Pozostałe metody mają raczej znaczenie bardziej teoretyczne niż praktyczne.

Tab. 1 Podział metod wyznaczania wilgotności

Rodzaj metod	Nazwa metody	Mierzony parametr
Chemiczne	wskaźnikowa	zmiana zabarwienia papierka wskaźnikowego pod wpływem zawilgocenia materiału
	karbidowa (CM)	ciśnienie acetyleny (powstałego w wyniku reakcji karbidu z wodą) w komorze hermetycznej
Fizyczne elektryczne	elektrooporowa	zmiana oporu elektrycznego spowodowana zmianą zawilgocenia
	mikrofalowa	tłumienie mikrofal przechodzących przez zawilgocony materiał
	dielektryczna	zmiana stałej dielektrycznej materiału w wyniku zmiany zawilgocenia
Fizyczne jądrowe	neutronowa	ilość neutronów spowolnionych spowodowana zderzeniem z atomami wodoru
	prześwietlania promieniowaniem γ	zmiana natężenia promieniowania γ po przejściu przez badany materiał

3.3.1. Metoda pojemnościowa – dielektryczna

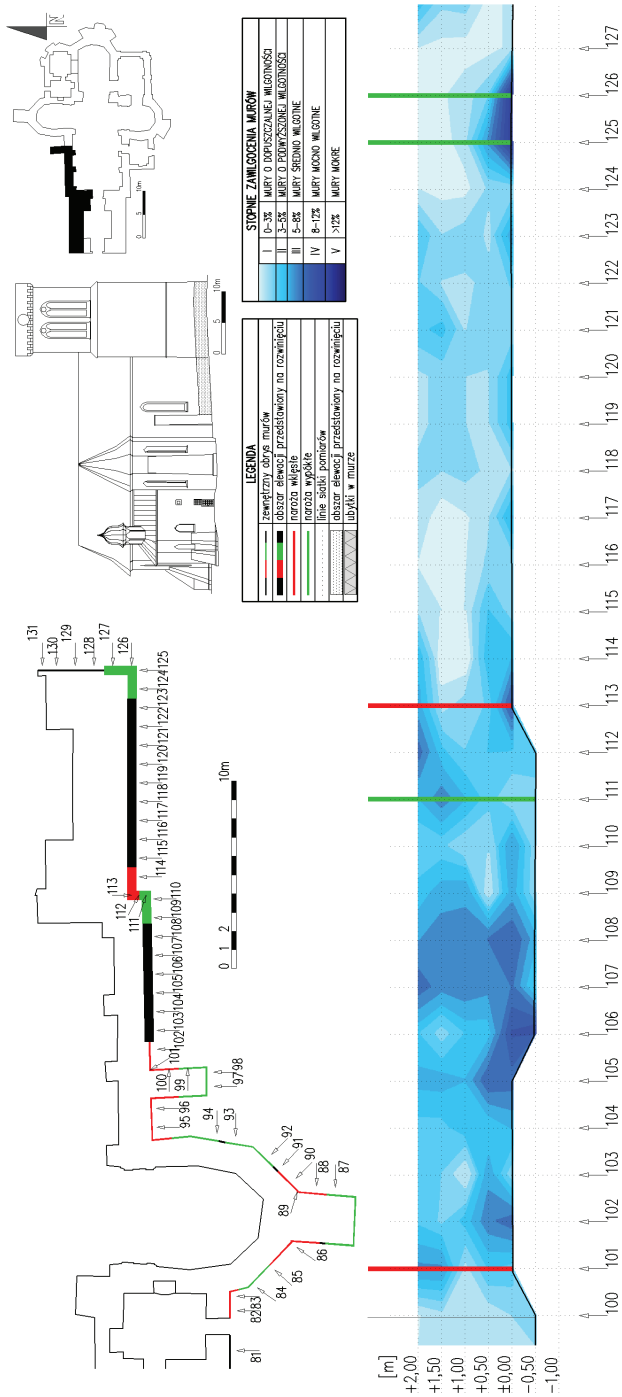
Metoda dielektryczna polega na wykorzystaniu zjawisk zmiany pojemności elektrycznej materiału wraz ze zmianą zawartości wilgoci. Istnieje, bowiem związek między wilgotnością materiału a jego stałą dielektryczną. Stała dielektryczna E jest wielokrotnością pojemności elektrycznej kondensatora, w którym dielektrykiem jest określone ciało w miejsce powietrza lub próżni. Stała dielektryczna wody jest największa spośród wszystkich materiałów w budownictwie, wynosi ona $E = 81$. Stała dielektryczna wilgotnych stałych i ciekłych substancji osiąga wartość 2–7. Dzięki dużej różnicy między wartością stałej dielektrycznej wody i bezwodnych substancji można przyjąć proporcjonalność między wilgotnością materiałów a ich stałą dielektryczną. Zaletą tej metody jest brak inwazyjności oraz łatwość i szybkość pomiaru. Największym mankamentem niewielka głębokość pomiaru zwykle do kilkudziesięciu milimetrów oraz błąd pomiaru przy badaniu materiałów silnie zasolonych. W związku z dużą niepewnością wyniku często urządzenia tego typu traktowane są jako tzw. „poszukiwacze wilgoci”.



Fot. 12 Wilgotnościomierz dielektryczny LB-796



Fot. 13 Wilgotnościomierz dielektryczny LB-795



Rys. 10 Mapa zawilgoczenia opracowana na podstawie wyników badań metodą dielektryczną. Wyższe stopnie zawilgoczenia oznaczone ciemniejszymi kolorami Archiwum Katedry Konserwacji Zabytków

Pomimo wspomnianych ograniczeń pomiary dielektryczne są bardzo dobrym rozwiązaniem w badaniach stanu wilgotnościowego obiektów w ruinie. Ze względu na ich duże rozmiary, badania wilgotności metodą laboratoryjną są w nich trudne do przeprowadzenia. Określenie stanu wilgotnościowego wymaga pobierania próbek na 2–3 wysokościach co kilka metrów. Oznacza to konieczność wykonania bardzo dużej liczby odwiertów ingerujących w zabytkową strukturę. Użycie mierników dielektrycznych pozwala na bardzo szybkie i nieinwazyjne wykonanie setek pomiarów. Na ich podstawie możliwe jest wykonanie map zawilgocenia, graficznie ilustrujących stan wilgotnościowy dużych powierzchni murów. (Rys. 10 Mapa zawilgocenia opracowana na podstawie wyników badań metodą dielektryczną. Wyższe stopnie zawilgocenia oznaczone ciemniejszymi kolorami Archiwum Katedry Konserwacji Zabytków.) Mapa tak pozwala również na świadomy wybór miejsc, z których pobrany może zostać materiał do badań laboratoryjnych. W sposób znaczny ogranicza to koszty i zakres ingerencji w zabytkową strukturę.

3.3.2. Metoda opornościowa

Podstawową działaniem metody elektrooporowej jest badanie zmiany pola elektrycznego wytworzone w sposób sztuczny w ośrodku przez układ elektrod zasilanych prądem stałym. Pomiar bazuje na pomiarze rezystancji zawilgoconego materiału pomiędzy układem dwóch elektrod. Zdecydowanie częściej mierniki opornościowe wykorzystywane są do pomiaru wilgotności materiałów drewnianych i drewnopochodnych. W zależności od własności badanego materiału oraz charakteru pomiarów zmienia się ustawienia miernika. Metodę opornościową zaliczamy do metod niszczących, gdyż pomiar polega na wciśnięciu cienkich igieł pomiarowych, które pozostawiają niewielkie otwory w badanym materiale.



Fot. 14 Wilgotnościomierz Protimeter Timbermaster Moisture Meter



Fot. 15 Sonda rezystancyjna LB-796RM

Tab. 2 Przykładowa tabela z wynikami pomiarów wilgotności konstrukcji więźby metodą opornościową. Jaśniejszym kolorem oznaczono elementy o wilgotności dopuszczalnej, ciemniejszym elementy o podwyższonej wilgotności

Oznaczenie	Wilgotność [%]
<i>oznaczenie miejsca pomiarowego</i>	<i>wartość wilgotności</i>
...	...
...	...

Przy badaniach murów obiektów zabytkowych metoda opornościowa wykorzystywana jest sporadycznie. Związane jest to z najczęściej wysokim zasoleniem badanych materiałów. Przy dużej ilości jonów w wodzie znajdującej się w murach mierniki opornościowe podają wartości zawyżone, często nawet kilkukrotnie w stosunku do rzeczywistej wartości. Zdecydowanie częściej pomiar opornościowy wykorzystywany jest do badania drewna. Zakres ingerencji jest na tyle mały, że może być on z powodzeniem stosowany nawet w badaniu elementów o bardzo dużej wartości.

3.3.3. Metoda mikrofalowa

Metoda ta zalicza się do bezkontaktowego pomiaru wilgotności. Polega na pomiarze przesunięcia fazowego oraz stopnia tłumienia fali elektromagnetycznej w badanym materiale. Na podstawie zależności tych parametrów od masy wody znajdującej się w próbce można wyznaczyć zawartość wilgoci. Jeżeli grubość próbki oraz długość fali są stałe, to tłumienie zależne jest tylko od dielektrycznych właściwości materiału.

Pomiar wilgotności polega na zetknięciu sondy z badanym materiałem i odczytanie wyniku. Metoda mikrofalowa pomiaru wilgotności materiałów jest zdecydowanie mniej popularna od pomiarów pojemnościowych i opornościowych. Wpływa na to przede wszystkim znacznie wyższa cena urządzeń oraz wyraźnie krótszy czas stosowania jej w badaniach materiałów. Problemem jest również brak odczytu wilgotności w %. Najczęściej mierniki wyświetlają wyniki w jednostkach nie mianowanych, co utrudnia interpretację uzyskanych wartości.



Fot. 16 Wilgotnościomierz TROTEC T610



Fot. 17 Pomiar wilgotności metodą mikrofalową

3.3.4. Metoda chemiczna

Jedną z najpopularniejszych metod badania wilgotności metodami pośrednimi jest metoda chemiczna – karbidowa. Próbkę pobrana jest z przegrody najczęściej przez wywiercenie. Następnie do szczelnego naczynia stalowego, wyposażonego w manometr, wprowadza się określoną naważkę pobranego materiału i węgla wapnia (karbidu). Dostępne są również zestawy pomiarowe z ampułkami zawierającymi gotowe naważki węgla wapnia. Przy wstrząsaniu naczyniem następuje rozbicie ampułki oraz zmieszanie zawartości. Zachodząca według wzoru: $\text{CaC}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{C}_2\text{H}_2 + \text{Ca(OH)}_2$ reakcja powoduje wydzielanie się acetyleny i wzrost ciśnienia w butli, którego wartość ustala się po pewnym czasie. Wilgotność próbki odpowiadająca wytworzonemu ciśnieniu można odczytać z dołączonej do urządzenia tabelki – w urządzenia starszego typu. W nowszych urządzeniach masa próbki badanego materiału, zakres pomiarowy manometru i wymiary komory pomiarowej zostały tak dobrane, że manometr jest wyskalowany bezpośrednio w procentach wilgotności względnej.

Pobór materiału powinien być wykonywany za pomocą młotka lub przecinaka. Należy pamiętać, aby unikać używania narzędzi elektrycznych aby nie wysuszyć próbki podczas uzyskiwania próbki. Materiał powinien być pobierany w miejscu najbardziej wilgotnym. Otwór powinien obejmować ok. 2/3 grubości, a wierzchnią warstwę powinno się pominąć. Tak otrzymany materiał należy rozdrobnić, tak aby maksymalny wymiar materiału wynosił 2 mm. Wszystkie czynności do momentu zamknięcia butli wykonuje się jak najszybciej, aby zapobiec zmianie wilgotności pobieranego materiału. Masa próbki potrzebnej do badania jest zależna od rodzaju higrometru oraz wilgotności materiału i wynosi w granicach 10–50g.

Dokładność pomiaru wynosi około $\pm 3\%$. Głównym powodem niezgodności wyników z badaniami metodą grawimetryczną jest to, że karbid nie wchodzi w reakcję z wodą związaną chemicznie. Różnice są bardzo widoczne podczas badania materiałów silnie zasolonych. Mimo stosunkowo dużego błędu pomiarowego, badania metodą karbidową są najdokładniejsze w grupie metod pośrednich. Dość istotną wadą pozostaje konieczność ingerencji w strukturę badanych elementów.



Fot. 18 Wilgotnościomierz WK-1 zestaw walizkowy



Fot. 19 Badanie wilgotności metodą karbidową odczyt ciśnienia acetyleny w zbiorniku

Tab. 3 Wyniki badań porównawczych wskazań miernika karbidowego w stosunku do wyników uzyskanych metodą wago-suszarkową (laboratoryjną)

Cegła ceramiczna pełna				
Nr próbki	Wag-susz [%]	Chemiczna [%]	Różnica [%]	Błąd [%]
1	2,65	1,42	1,23	46,4
2	5,62	4,6	1,02	18,1
3	8,91	7,76	1,15	12,9
4	11,98	8,81	3,17	26,4
5	13,26	10,74	2,52	19
6	14,91	11,36	3,55	23,8
7	16,97	14,94	2,03	11,9
8	18,98	15,74	3,24	17,1

Badania pośrednie (mimo stosunkowo dużej niepewności wyników) pozwalają na wstępne, szybkie określenie stanu wilgotnościowego obiektu. Ułatwiają świadomy wybór miejsc do dokładnych badań laboratoryjnych, a co za tym idzie minimalizują liczbę punktów, z których pobierany będzie materiał.

W przypadku obiektów w ruinie zdecydowanie najlepszą metodą pomiarową jest metoda dielektryczna. Pozwala ona na bardzo szybkie monitorowanie dużych i powierzchni i co nie zwykle istotne jest metodą nie ingerującą w tkankę historyczną.

3.4. Badania makroskopowe – „odkrywki”

Odkrywki mają charakter nieniszczący. Dzięki odkrywkom możliwa jest identyfikacja materiałów oraz określenie ich stanu technicznego. W celu wykonania odkrywek należy usunąć materiały przysłaniające badany element. Zawsze przed przystąpieniem do usunięcia wierzchnich warstw w celu odsłonięcia konstrukcji należy upewnić się, iż warstwy te nie podlegają ochronie konserwatorskiej.

Odkrywki na obiekcie podzielić możemy na dwie główne grupy:

- odkrywki konstrukcyjne – mają na celu określenie rodzaju materiału oraz technologii wykonania danego elementu (sposób przewiązania muru, łączenie elementów konstrukcji, sposób osadzenia i kotwienia elementów);
- odkrywki konserwatorskie – mają na celu ustalenie poszczególnych warstw na elementach wraz z kolejnością ich nanoszenia.

Wykonywanie odkrywek należy dokumentować rysunkowo i fotograficznie.

3.4.1. Odkrywki konstrukcyjne

Odkrywki konstrukcyjne podzielić można na następujące grupy:

- punktowe (odwierty);
- liniowe (odkucia, bruzdy, odkopy liniowe);
- powierzchniowe (odkucia, odsłonięcia, odkopy).

Odkrywki punktowe

Odkrywki punktowe wykonywane są w postaci odwiertów. Odwierty mają na celu uzyskanie informacji o: jednorodności materiału (pełna głębokość lub na nie pełną głębokość), rodzaju materiału (niepełna głębokość), ciągłości przegrody (pełna głębokość), grubości przegrody (pełna głębokość).

Wykonanie badania:

- badanie wykonujemy przy pomocy wiertarki z wiertłem odpowiedniego rodzaju (do betonu, cegły, drewna, stali) i o odpowiedniej długości;
- w czasie wiercenia obserwujemy zwiercinę (kolor, rodzaj, wilgotność). Pozwoli to na określenie materiału elementu którego badamy;
- wiercenie wykonujemy ze stałą siłą analizując potrzebną jej wielkość do przewiercenia się przez poszczególne partie materiału (pozwoli to ocenić zgrubnie jakość materiału);
- odnotowujemy (w razie wystąpienia) skokowy charakter pracy wiertła, łącznie z odnotowaniem aktualnej głębokości odwiertu (pozwoli to określić w przybliżeniu jednorodność materiału, wykryć pustki lub zmianę materiału).

Odkrywki liniowe

Odkrywki liniowe mają na celu zbadanie elementów powtarzających się (np.: wymiary cegły pod tynkiem) lub mają charakter pilotażowy przed wykonaniem odkrywek powierzchniowych lub innych (np.: wykonywanie bruzdy aż do napotkania belki nośnej).

Wykonanie badania:

Badanie wykonujemy przy pomocy wiertarki udarowej z odpowiednią końcówką (dłutem) lub ręcznie. Należy je poprzedzić ręcznym nadcięciem badanego materiału w celu ograniczenia strefy zniszczeń.

Odkrywki powierzchniowe

Odkrywki powierzchniowe mają na celu uzyskanie informacji o elementach powtarzających się, lub zależności pomiędzy większą ilością elementów konstrukcyjnych. Jako przykład można podać badanie sposobu przewiązania ścian i układu w nich cegieł.

Ten rodzaj odkrywek jest szczególnie cenny, ilość informacji możliwych do uzyskania jest bardzo obszerna. Odkrywki takie pozwalają ocenić: stan techniczny konstrukcji (zachowania), rodzaj materiału, technologię wykonania, oryginalność lub wtórność rozwiązania, wiek, kolejność powstawania. W obiektach zabytkowych najczęściej spotykane są odkrywki powierzchniowe wykonywane dla ścian i stropów.

W czasie wykonywania odkrywek stropów należy zwracać uwagę nie tylko na materiały konstrukcyjne, sposób oparcia na murach lub innych elementach konstrukcyjnych, ale również na materiały niekonstrukcyjne (np. polepa) mogą one również wskazywać na oryginalność i wiek konstrukcji. W przypadku ścian najczęściej (jest to najbardziej uzasadnione) odkrywki powierzchniowe powinny być wykonywane w narożach ścian i nad otworami. Odkrywka nad otworem pozwoli określić materiał, technologię i rodzaj nadproży oraz sposób oparcia stropów. Odkrywka w narożu pozwoli zbadać równocześnie dwie ściany przy niewiele większej powierzchni badania, a także pozwoli na analizę sposobu połączenia tych ścian.

Wykonanie badania:

- oznaczenie miejsca badania,
- nacięcie obrysu planowanego zakresu odkrywki,
- usunięcie warstw tynku,
- oczyszczenie odkrywki (uwidocznienie wiązania),
- dodatkowe odkucia na styku murów (przenikanie).

3.4.2. Odkrywki konserwatorskie

Badania zapraw i warstw malarskich prowadzone są przez konserwatorów-restauratorów dzieł sztuki. Mają na celu rozpoznanie wystroju i historycznej substancji budowlanej pod kątem ich budowy i użytych materiałów oraz faktury, kolorystyki, analizy nawarstwień, stanu zachowania i zniszczeń z podaniem ich przyczyn. Celem większości badań jest przygotowanie wytycznych do projektów konserwatorskich.

Badania *in situ* wystroju z reguły rozpoczynają się od szczegółowych oględzin obiektu. Na początku analizuje się warstwy widoczne w już uszkodzonych partiach zabytku, a następnie odsłania się spodnie warstwy w miejscach uznanych za optymalne dla występowania warstw malarskich. Optymalne punkty i przestrzenie badań przebudowanych struktur murowych i wtórnego wystroju malarskiego nie zawsze się ze sobą pokrywają.

Badania stratygraficzne na obiekcie zabytkowym mają na celu ustalenie i określenie chronologii występujących warstw technologicznych i nawarstwień historycznych, takich jak podstawowy budulec, zaprawy, podkłady i warstwy malarskie. Dane takie dostarczają wiedzy na temat oryginalnego charakteru obiektu, co w przypadku badań architektury poszerza wiedzę na temat pierwotnej technologii wykonania i oryginalnej kolorystyki elewacji i jej detalu architektonicznego. Układ warstw historycznych opowiada również wiele na temat dziejów badanego obiektu, takich jak ilości i jakości remontów, występowania elementów pierwotnych (oryginalnych, pochodzących z czasów powstania zabytku) i wtórnych (będących efektem późniejszych ingerencji w jego formę lub funkcję). Uzyskane dane w uzupełnieniu z informacjami na temat zabytku, takimi jak historia obiektu, materiał ikonograficzny, relacje mieszkańców i właścicieli, umożliwiają szczegółową analizę konserwatorską obiektu zabytkowego.

Szczególnej uwagi wymagają miejsca, w których polichromie najczęściej wykonywano, trudno dostępne miejsca, w których mogą znajdować się ślady pierwotnego opracowania kolorystycznego oraz miejsca planowanych badań struktury murowanej obiektu. Ilość tych ostatnich ze względu na głęboką ingerencje w strukturę budowli, jest ograniczona do niezbędnego minimum.

Podstawowym środkiem poznania stratygrafii warstw malarskich i tynków są tzw. odkrywki i sondy. Odkrywki to metoda pozwalająca na odsłonięcia następujących po sobie warstw (muru, tynku lub warstwymalarskiej) w celu określenia zasięgu jej występowania (odkrywki pasowe, krzyżowe). Sondy to rezultat odsłonięcia kolejnych warstw leżących na sobie (sondy schodkowe, zegarowe). Niezależnie od nomenklatury, przedmiotem badań struktur murowych i wystroju architektonicznego jest zarówno układ stratygraficzny, jak i powierzchniowy zakres występowania warstw.

Z czasem wyróżniono grupy formalne odkrywek i sond, odkrywki punktowe, pasowe, szeregowe, krzyżowe, nieregularne, sondy schodkowe, zegarowe. Opracowany znormalizowany system siatki sond krzyżowych i odkrywek krzyżowo-pasowych, Rozrysowane na ścianach poziome i pionowe pasy o szerokości 10 cm w odległości 1m i w ich obrębie wykonuje się odkrywki usuwając zewnętrzną warstwę tynku lub warstwę malarską. W trakcie wykonywania odkrywek i sond kolejne warwy usuwane są mechanicznie, za pomocą narzędzi dostosowanych do rodzaju i wielkości nawarstwień. Tynk zazwyczaj zbijane są za pomocą różnego rodzaju młotków, dłut i przecinaków. Delikatne warstwy malarskie zdejmowane są przy użyciu odpowiednich noży i skalpeli. Do usuwania pozostałości wtórnych warstw z zagłębień faktury spodnich opracowań stosowane są nawet igły.



Fot. 20 Odkrywka pasowa z sondami odsłaniającymi spodnie warstw opracowań malarskich



Fot. 21 Sonda schodkowa ukazująca układ warstw tynków i malatur na ścianie

Badania *in situ* zapraw i wymalowań dostarczają przede wszystkim wiedzy na temat ilości i jakości przeprowadzanych remontów a także, co istotne pozwalają określić, które z odkrytych warstw są szlachetne – mają charakter mazerunku, polichromii, stiuku itp., a które były mniej wartościowe – odświeżanie pomieszczenia zwykłą farbą. Dopiero dalsze badania specjalistyczne poszczególnych warstw dostarczą dokładniejszej wiedzy na ich temat.

Należy mieć na uwadze, że badanie nie wskaże dokładnej daty powstania każdej z warstw. Takimi informacjami dysponuje się, co do pierwszej i ostatniej z warstw, dane te pochodzą jednak najczęściej z badań historycznych i wywiadów z mieszkańcami. Zwykle umieszczone informacje o dacie powstania są informacjami orientacyjnymi.

W trakcie odsłaniania poszczególnych warstw tynków i malatur, obserwuje się te powierzchnie okiem nieuzbrojonym jak i z wykorzystaniem szkieł powiększających. Wykonywana jest dokumentacja fotograficzna, uzyskiwana w różnych pasmach promieniowania elektromagnetycznego (UV, VIS, IR). Wykonane analizy pozwalają na wskazanie miejsc pobrania próbek do badań laboratoryjnych (IR, TAR, RTG). Z analizy próbek można pozyskać informacje określające technologie, technikę wykonania poszczególnych warstw, stan ich zachowania i przyczyny zniszczeń oraz identyfikację nawarstwień wynikających z oddziaływania środowiska naturalnego. Wykonywanie odkrywek i sond jest badaniem inwazyjnym, stwarza ryzyko uszkodzenia odsłanianych warstw, jest praco-

chlonne i trudne do zastosowania jeśli występują rozwarstwienia warstw tynków i malatur. Obecnie coraz częściej w badaniach stosowane są metody termowizyjne i radarowe. Metoda radarowa pozwala na uwidocznienie występujących pod tynkami zarysów zamurowanych okien i drzwi wątków murów, pęknięć, pustych przestrzeni w murach i od spójnej w tynkach i uzupełnień tynkarskich. Termografia synchroniczna lokalizuje odspojenia tynków i warstw malarskich, które występują na różnych głębokościach m uwidacznia zarys kompozycji malowideł ściennych zasłoniętych warstwami pobiału lub przemalowaniem. Metoda radarowa pozwala na uzyskanie informacji o strukturach wewnętrznych murów i stopniu ich spójności. Pozwala na identyfikację miejsc z materiałami niejednorodnymi, pomiary grubości murów, zapraw, tynków, zamurowanych otworów okiennych i drzwiowych.

Po przeanalizowaniu układu warstw można stworzyć obraz stratygrafii, przedstawiony w formie tabeli, w której zamieszcza się informacje na temat poszczególnych warstw oraz przyporządkowuje je do okresu z jakiego pochodzą.

Tab. 4 Stratygrafia zbiorcza malowidła ściennego

Warstwy technologiczne	Cyframi arabskimi oznacza się kolejność warstw technologicznych zaczynając od lica obiektu.
Oznaczenie graficzne	Przy wykonywaniu rysunku stratygraficznego stosuje się symbole graficzne obrazujące warstwy technologiczne. Długość poszczególnych warstw technologicznych na rysunku i ich przerywniki obrazują nakładanie się tych warstw na siebie. Ilustrując przybliżony zasięg ich powierzchni na obiekcie.
Warstwy Chronologiczne	Cyframi rzymskimi oznacza się kolejność warstw chronologicznych zaczynając od podłoża. numeracja warstw chronologicznych przed konserwacją ilustruje nawarstwienia obiektu w kolejnych etapach historycznych.
Datowanie	Warstwy chronologiczne należy datować, datę umieścić przy kolejnym numerze warstwy. pozwala to na rozpoznanie epok stylowych oraz uściśła czas powstania.
Określenie Warstwy	Każda warstwa technologiczna powinna być krótko opisana np. zaprawa wapienna, pobiała, farba olejna niebieska.
Grubość warstw	W przypadku opisywania warstw o dużej grubości (np. zaprawa) należy podać przeciętną grubość w milimetrach.

3.5. Badania zniszczeń spowodowanych korozją biologiczną

Za procesy degradacji obiektów zabezpieczonych w postaci trwałej ruiny odpowiedzialnych jest szereg czynników. W większości przypadków procesy te spowodowane są działaniem czynników atmosferycznych (woda, słońce, mróz, wiatr itd.), związane ze zmianami warunków gruntowo wodnych, zmianami w statyce obiektów czy też działalnością człowieka. Odrębną grupą są organizmy żywe zasiedlające i porastające obiekty.

Do grupy organizmów odpowiedzialnych za niszczenie ruin zalicza się głównie rośliny zielone jedno i wieloletnie, drzewa i krzewy, grzyby domowe, grzyby pleśniowe,

glony, porosty, mchy oraz owady⁵. W przypadku obiektów pozostawionych w postaci trwałej ruiny negatywne działanie grzybów domowych i owadów ma znaczenie marginalne. Wszystkie pozostałe z wymienionych w mniejszym lub większym stopniu wpływają na procesy degradacji ruin. Organizmy te odpowiadają za zjawisko korozji biologicznej, zwaną też biodeterioracją, rozumianą jako zróżnicowane formy niszczenia elementów budowlı wywołane działaniem organizmów żywych, tzw. szkodników biologicznych. Wyróżnia się chemiczną asymilacyjną i dysymilacyjną korozję biologiczną. Pierwsza jest najczęstszą formą tego procesu i ma miejsce wówczas, kiedy materiał jest degradowany z racji swej wartości odżywczej. Druga chemiczna dysymilacyjna biodeterioracja (korozja), występuje gdy metabolity drobnoustrojów uszkadzają materiał⁶.

W przypadku murów chemiczna asymilacyjna korozja nie ma większego znaczenia ze względu na minimalne ilości substancji odżywczych znajdujących się w obiekcie. Ogranicza się jedynie do tych murów gdzie w konstrukcji stosowane były elementy drewniane lub też drewno wykorzystano jako materiał elementów zadaszania, komunikacji np.: pomosty i punkty widokowe na koronie murów.

Duże znaczenie ma natomiast zjawisko dysymilacyjnej korozji biologicznej. Obrastanie powierzchni materiałów przez organizmy żywe, znane w literaturze przedmiotu jako „biofouling” powodować może szereg niekorzystnych zmian wewnątrz i na powierzchni murów, korozję, pigmentację, wydzielanie toksycznych metabolitów do materiału, uszkodzenia struktury murów na skutek rozrostu systemu korzennego⁷.

Rozwój korozji biologicznej i roślinności powoduje szereg niekorzystnych zmian w ruinie. Zmiany te można podzielić na: techniczne, estetyczne i higieniczno – sanitarne. Skutki techniczne, polegają przede wszystkim na obniżeniu wytrzymałości elementów i konstrukcji, co prowadzi do ich powolnej degradacji. Porażenie korozją biologiczną ma również znaczenie estetyczne, polegają na obniżeniu walorów estetycznych porażonych elementów. Skutki higieniczno – sanitarne, polegające na pogorszeniu stopnia zdrowotności obiektów dla ludzi i zwierząt, w przypadku murów w ruinie nie mają większego znaczenia⁸.

Z punktu widzenia konserwatorskiego zdecydowanie największe znaczenie dla ruin mają skutki techniczne spowodowane korozją biologiczną i rozwojem roślinności. Dlatego ze względu na techniczny charakter opracowania w dalszej części największy nacisk położony zostanie na wpływ korozji biologicznej na procesy degradacji ruin oraz zasady postępowania przy usuwaniu organizmów powodujących korozję biologiczną i roślinność

⁵ J. A. Eklund, M. E. Young, *Biological Growth on Masonry: Identification & Understanding*. Inform. Information, Published by Historic Scotland, January 2013; Kozarski P., Molski P., *Zagospodarowanie i konserwacja zabytkowych budowli*, t. 14, Warszawa 2001.

⁶ A. B. Strzelczyk, *Czynniki niszczące kamienie. Czynniki biologiczne*, [w:] *Zabytki kamienne i metalowe ich niszczenie i konserwacja profilaktyczna*, red. W. Domaśłowski. Toruń 2011, s. 135–157.

⁷ J. Jasieńko., O. Mierzejewska, K. Hamrol, W. Misztal, *Utrwalanie koron murów obiektów historycznych przeznaczonych do ekspozycji w formie trwałej ruiny*, „Wiadomości konserwatorskie” nr 30, 2011, s. 117–132.

⁸ A. Sieniawska-Kuras, P. Potocki, *Przyczyny zniszczeń obiektów budowlanych i elementów architektonicznych. Procesy biologiczne*. [w:] *Renowacja elementów architektury*. Krosno 2012, s. 53–55.

niepożądaną. Mechanizm biodegradacji obiektów zabezpieczonych w postaci ruiny jest złożony i zależy od wielu czynników. Do najważniejszych należą: materiał z jakiego został wzniesiony, konstrukcja wysokość i grubość murów, stan wilgotnościowy murów, miejsce w jakim został wzniesiony, rodzaj i wielkość drzew w najbliższym otoczeniu, rodzaje organizmów zasiedlających mury, jakość opieki zarządcy itd. Wszystkie te czynniki w mniejszym lub większym stopniu wpływają na stan techniczny murów związany z niekorzystnym działaniem organizmów powodujących korozję biologiczną i obecnością roślinności niepożądaną.

Ze względu na dużą różnorodność uszkodzeń spowodowanych przez organizmy żywe zaproponowano ich podział na trzy grupy. Podział uwzględnia głębokość uszkodzeń oraz przyporządkowuje im grupy organizmów odpowiedzialnych za zniszczenia:

- Grupa I – uszkodzenia powierzchniowe (glony, mszaki, grzyby pleśnie i porosty).
- Grupa II – uszkodzenia wgłębne lica i korony (roślinność niska – trawy, byliny i sukulenty).
- Grupa III – uszkodzenia konstrukcji (roślinność wysoka – drzewa i krzewy).

Grupa I – uszkodzenia powierzchniowe

Do pierwszej grupy zaliczyć można uszkodzenia spowodowane rozwojem organizmy pozbawione systemów korzennych lub takie u których mają one formę szczątkową. W grupie tej znajdują się glony, porosty, mszaki i grzyby-pleśnie. Organizmy te najczęściej jedynie porastają powierzchnię materiału. Ze względu na różne wymagania środowiskowe (wilgotność, pH podłoża, nasłonecznienie) rozwijać się mogą w różnych miejscach i na większości materiałów występujących w obiektach.

Glony, mszaki i grzyby-pleśnie mają dość duże wymagania co do wilgotności podłoża dlatego też obrastają pas przyziemia murów oraz miejsca zacienione. Największe skupiska tych organizmów obserwowane są na murach od strony północnej. Siedliskiem ich są najczęściej kamienie naturalne i cegła, ale występują również na spoinach i tynkach Ekspansja początkowo powolna z czasem staje się coraz intensywniejsza. Wpływa na to możliwość zatrzymywania wilgoci przez glony i mszaki, co prowadzi do jeszcze większego zawilgocenia podłoża w obrębie ich występowania. W konsekwencji na wilgotnych powierzchniach dochodzi do rozwoju kolejnych organizmów. Rozwój ustaje najczęściej przy zmianie warunków wilgotnościowych.

Porosty mają zdecydowanie mniejsze wymagania co do wilgotności podłoża. Są dość odporne na niskie i wysokie temperatury. Dzięki możliwości pobierania wilgoci z powietrza są niezależne od warunków panujących na podłożu Porastają kamienie, cegły, spoiny i tynki. Ich kolorystyka jest bardzo zróżnicowana od jasnych barw do koloru czarnego. Z powodu koloru owocników, często są traktowane jako zabrudzenia.

Powierzchnowe uszkodzenia spowodowane przez niektóre gatunki porostów są spowodowane wydzielaniem kwasów i wzrostem komórek w porach kamienia. Glony i grzyby również wydzielają organiczne kwasy, zwłaszcza kwas szczawiowy. Dodatkowo na skutek wrastania strzępek grzybów w pory materiałów może dochodzić do roz-

luźnienia ich spistości, a więc zniszczenia warstwy powierzchniowej. Z kolei bakterie siarkowe w procesie metabolicznym powodują powstanie kwasu siarkowego i zapoczątkują szereg reakcji chemicznych prowadzących w rezultacie do pęknięcia i kruszenia się materiałów. Bakterie nitryfikacyjne utleniają amoniak (zawarty w wodzie deszczowej, kurzu i sadzy) do kwasu azotowego, który np. rozpuszcza powierzchniowe warstwy kamieni tworząc charakterystyczne nacieki i kraterki lub tzw. wykwitły śniegowe⁹.



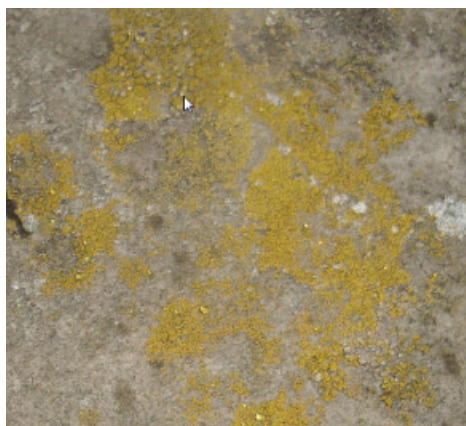
Fot. 22 Kolonie glonów na przewilgoconym murze z cegły ceramicznej



Fot. 23 Rozwój glonów i porostów w narożu muru bezpośrednio pod porastającym mur i koronę bluszczem



Fot. 24 Porażony porostami fragment tynkowanego sklepienia



Fot. 25 Kolonie porostów na historycznym tynku muru zewnętrznego obiektu

⁹S. Ferraby, *The ecology of ruin sites* [w:] *Conservation of Ruins*, ed. John Ashurst, Elsevier Science & Technology Conservation of Ruins, ed. John Ashurst, 2006, s. 209–210.



Fot. 26 Mchy porastające niską koronę muru północnego ruiny



Fot. 27 Porażenie mchami i glonami korony i lica muru

Grupa II – uszkodzenia wgłębne lica i korony

Druga grupa obejmuje uszkodzenia wgłębne warstw przypowierzchniowych muru (lica i korony). Zniszczenia są powodowane przez niewielkie rośliny wykształcające system korzenny, a co za tym idzie wymagające odpowiedniego podłoża lub miejsca, w którym mogą wzrosnąć. Do grupy tej zaliczono wszystkie gatunki roślinności niskiej w obiektach w ruinie: trawy, byliny, bluszcze i sukulenty.

Rozwój roślin zielonych rozpoczyna się wraz z pojawieniem minimalnej ilości humusu w szczelinach i na koronie muru. Początkowo dominują przede wszystkim niewielkie rośliny jedno roczne i trawy. Z czasem wraz z przyrostem warstwy humusowej (rozkład roślin, nawiewanie gleby) pojawiają się rośliny wieloletnie. Wzrost ich jest szczególnie intensywny w miejscach gdzie utrzymuje się podwyższona wilgotność, jednak wiele gatunków jest w stanie zasiedlać fragmenty suche i mocno nasłonecznione. Wzrost i rozkład roślinności powodują pojawianie się w murze kwasów humusowych oraz wzrost ilości azotanów. Kwasy powodują rozpuszczanie substancji wiążących w spoinach ich osłabienie, a w konsekwencji szereg uszkodzeń powierzchni lica. Wzrost stężenia azotanów odpowiada za kolejne uszkodzenia warstw przypowierzchniowych. Krystalizujące sole zwiększają swoją objętość rozsadzając pory spoin i materiałów murowych. Ciśnienie krystalizacyjne jest na tyle wysokie, że do uszkodzeń dochodzi nawet w przypadku skał o dużej twardości.

Kolejnym skutkiem rozwoju roślinności niskiej są uszkodzenia na styku spoiny i materiału murowego związane z rozwojem systemu korzennego. Rozrastające się korzenie powodują uszkodzenia słabych (najczęściej wapiennych lub glinianych) spoin, co prowadzi do kolejnych uszkodzeń warstw lica lub pojedynczych odspojen drobnych kamieni lub całych fragmentów. Substancje chemiczne wydzielane przez roślinność oraz pochodzące z ich rozkładu wpływają również na przebarwienia powierzchni lica powodując negatywne efekty estetyczne.



Fot. 28 Fotografia mocno nasłonecznionej elewacji południowej. Rozwój roślinności w szczelinach muru



Fot. 29 Uszkodzenie lica muru związane z rozrostem systemu korzeniowego roślinności niskiej



Fot. 30 Porośnięte roślinnością jedno i wieloletnią korona i lico muru kurtynowego



Fot. 31 Ekspansja roślin niskich i mchów na koronie muru z cegły ceramicznej. W pierwszym planie widoczne młode krzewy



Fot. 32 Całkowicie zarośnięta zielenią niską korona muru. Szczelna warstwa humusu i zieleni uniemożliwia odparowywanie zatrzymanej w murze wilgoci



Fot. 33 Porośnięty roślinnością relikw muru. Duża ilość zieleni powoduje nieczytelność ruiny

Grupa III – uszkodzenia konstrukcji

Trzecia grupa obejmuje wielkopowierzchniowe uszkodzenia lica i samej konstrukcji muru. Powodują je rośliny wieloletnie, których system korzenny jest bardzo rozbudowany i przerasta mury czy też sklepienia obiektu. Do trzeciej grupy zaliczono drzewa i krzewy.

Wpływ roślinności wysokiej na mury jest znacznie większy niż w przypadku pozostałych grup organizmów opisanych w poprzednich podrozdziałach. Podobnie jak one drzewa i krzewy oddziałują na substancję chemiczną. Korzenie wydzielają duże ilości kwasów organicznych powodujących rozkład węglanu wapnia w spoinach wątków murowych. Prowadzi to do osłabienia wiązań spoina-materiał murowy wewnątrz muru. Wraz z wodą związki te przemieszczają się do powierzchni, a następnie po odparowaniu wody krystalizują. Krystalizacja powoduje doszczelnienie przypowierzchniowych warstw oraz pojawienie się zacieków węglanowych.

Opadające liście zalegają w szczelinach i zagłębieniach muru, a po rozkładzie stanowią podłoże pod rozwój roślinności niskiej oraz mszaków. Dodatkowo wraz z wodą do wnętrza muru przedostają się duże ilości azotanów pochodzących z rozkładu liści.

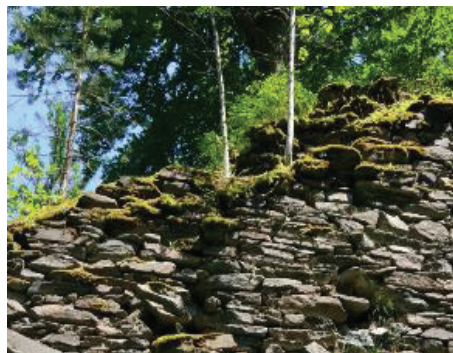
Drzewa i krzewy oddziałują na ruinę również mechanicznie. Rozrastające się korzenie wypełniają szczeliny muru i powodują powstanie coraz to nowych pęknięć i odprysków powierzchniowych kamienia i cegły. Duże systemy korzenne przerastając mury z czasem mogą doprowadzić do wielko powierzchniowych odspojień lica oraz znacznych uszkodzeń konstrukcji całego muru.

Obecność wysokich drzew przerastających mury lub też w ich najbliższym otoczeniu może być również bardzo niebezpieczna podczas intensywnych burz lub silnie wiejących wiatrów. Wyrwane z korzeniami lub złamane może doprowadzić do istotnych zniszczeń ruiny lub też być zagrożeniem dla ludzi przebywających na obiekcie.

Stale zacienienie muru przez roślinność wysoką utrudnia jego odsychanie co może doprowadzić do intensywnego rozwoju roślinności niskiej, glonów i mszaków.



Fot. 34 Fragment sklepienia intensywnie porośnięty krzewami



Fot. 35 Mur kamienny z młodymi brzożami na koronie



Fot. 36 Jarzębina zakorzeniona w szczelinie pomiędzy murem korony i nadprożem



Fot. 37 Krzew z systemem korzennym przerastającym mur z cegły ceramicznej



Fot. 38 Uszkodzone przez korzenie sklepienie z cegły ceramicznej



Fot. 39 Olbrzymie drzewo przeraastające systemem korzennym sklepienie z kamienia

Zasady postępowania przy usuwaniu korozji biologicznej i roślinności

Problemy dotyczące oddziaływania roślinności na obiekty w trwałej ruinie jest zagadnieniem otwartym, którym zajmują się zarówno architekci, konserwatorzy jak i inżynierowie. W dużej liczbie publikacji naukowych i popularno-naukowych oddzielną grupę stanowią poradniki dla zarządców i opiekunów obiektów¹⁰. Wytyczne w poradnikach wskazują na konieczność konsultacji ze specjalistami, przed rozpoczęciem jakichkolwiek działań dotyczących postępowania z roślinnością porastającą obiekty utrzymane w trwałej ruinie.

¹⁰ J. Donnelly, *Ruins: the Conservation and Repair of Masonry Ruins*, Government Publications Sales Office, Dublin 2010; R. Fawcett, *Treatment of vegetation at monuments [w:] The Conservation of Architectural Ancient Monuments in Scotland, Guidance on Principles*, Published by Historic Scotland Longmore House, Salisbury Place, Edinburgh 2001, s. 44–47; P. Kozarski, P. Molski, *Op. cit.*

Usuwanie organizmów odpowiedzialnych za rozwój korozji biologicznej związane jest z koniecznością prowadzenia działań, które w sposób bezpośredni lub pośredni mogą wpływać na zachowanie samej ruiny. Ze względu na możliwość wystąpienia podczas tych prac niekorzystnych zmian: uszkodzenia konstrukcji, powierzchniowe zniszczenia łąca, uszkodzenia detali, zmiana kolorystyki itp. usuwanie organizmów odpowiedzialnych za korozję podlegać powinno określonym zasadom. Ze względu na różnice związane z budową organizmów (brak lub istnienie systemów korzennych), miejscem występowania oraz rodzajem uszkodzeń spowodowanych działaniem organizmów zasady postępowania zebrane zostały w dwóch grupach.

Zasady postępowania przy usuwaniu glonów, mchów porostów i grzybów-pleśni

- Ustalenie czy występujące organizmy muszą być usunięte, czy też ich wpływ na materiał jest nieistotny i mogą pozostać.
- Określenie stopnia porażenia i rodzaju uszkodzeń.
- Przyjęcie metody usuwania organizmów. Metoda musi uwzględniać, powierzchnię poddaną pracom, dostępność, teksturę materiału, wytrzymałość przypowierzchniowych warstw oraz stopień porażenia.
- Przy mechanicznym usuwaniu koniecznym jest wykonanie prób skuteczności czyszczenia i wpływu użytej metody na podłoże.
- Stosowanie preparatów chemicznych zwalczających organizmy wymaga określenia wpływu substancji na oczyszczane powierzchnie. Związki zawarte w stosowanych substancjach nie mogą powodować zmian w strukturze, obniżać wytrzymałości czy też powodować zmian w kolorystyce.
- Po wykonaniu prac oczyszczających przeprowadzenie dezynfekcji powierzchni muru.
- Określenie po jakim czasie zabiegi wymagają powtórzenia.

Zasady postępowania przy usuwaniu roślinności niepożądaną

- Przed rozpoczęciem prac należy dokonać przeglądu stanu murów i określić miejsca, w których przeprowadzone zostaną prace.
- Ustalenie, które grupy roślin podlegać mają usunięciu, w określonych przypadkach może być podjęta decyzja o pozostawieniu niektórych roślin lub ich części (bluszcz, trawy porastające zabezpieczone korony murów).
- W przypadku konieczności prac prowadzonych na dużych wysokościach, szczególnie przy wycince drzew prac powinny być zlecone specjalistom.
- Rośliny jednoroczne i wieloletnie (trawy, byliny i chwasty) w miarę możliwości usuwać należy z całym systemem korzennym.
- Po wyrwaniu roślin z szczelin i zagłębień należy w miarę możliwości usuwać zalegające tam warstwy ziemi. Zabieg ten w przyszłości opóźni rozrost kolejnych organizmów.
- Przed wykorzystaniem preparatów chemicznych, każdorazowo należy określić ich wpływ na materiał ruiny.
- Stosowane środki chemiczne w obrębie ruiny nie mogą wpływać negatywnie na roślinność planowaną.

- Usuwanie wysokich drzew zarówno przy samych murach jak i tych z systemem korzennym przerastającym konstrukcję musi być poparte analizą wpływu wycinki na zachowanie murów.
- Nie zaleca się usuwania pni i korzeni po wycince drzew jeżeli wpływają one za stabilność skarp przy murach i stateczność samych murów.
- W przypadku usuwania drzew i krzewów istnieje konieczność uwzględnienia okresów lęgowych ptaków.
- Po przeprowadzeniu prac oczyszczających ruinę z zieleni niepożądaney zaleca się okresowe monitorowanie murów i prowadzenie prac zapobiegających zarastaniu.

4. Badania laboratoryjne materiałów

Badania laboratoryjne pozwalają na uzyskanie szczegółowych informacji dotyczących cech chemicznych, fizycznych i mechanicznych materiałów, z których wzniesiono obiekt. W większości przypadków badania te mają charakter niszczący i wymagają pobrania materiału z zabytkowej substancji. W przypadku materiałów budowlanych prowadzone są za równo dla materiałów historycznych jak i wprowadzanych podczas prac konserwatorskich. Metodą laboratoryjną bada się głównie elementy wykończenia i wystroju architektonicznego.

W przypadku obiektów w ruinie dominującym elementem są konstrukcje mурowe. Konstrukcje te są o tyle specyficzne, że ich nośność nie jest proporcjonalnie powiązana z cechami fizycznymi i mechanicznymi elementów, z których są wykonane. Określenie wytrzymałości muru tylko i wyłącznie na podstawie cech tych materiałów jest niemalże niemożliwe lub bardzo niedokładne. Dlatego też badanie wytrzymałości muru opisano poniżej jako oddzielne badanie, nie związane z badaniami cech fizycznych materiałów konstrukcji.

4.1. Badania cech mechanicznych materiałów

Podczas analiz konstrukcji najistotniejszym parametrem jest wytrzymałość na ściskanie jej elementów oraz jej samej. Konieczność przeprowadzenia obliczeń wytrzymałościowych może być spowodowana między innymi: potrzebą dociążenia konstrukcji, zmianą schematu statycznego, adaptacją, nadbudową, rozbudową, przebudową itd. Obecnie stosowanych jest kilka metod nieniszczących lub średnio niszczących (opisanych w pierwszej części) do wyznaczenia tego parametru. Na podstawie licznych badań stwierdzono jednak błąd szacowania wytrzymałości metodami pośrednimi na poziomie 20%. Aby zatem mieć wynik bardzo dokładny należy wykorzystać niszczącą metodę laboratoryjną.

Celem badania jest określenie wytrzymałości na ściskanie muru. Dodatkowo na pobranych próbkach istnieje możliwość wyznaczenia również wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, moduły Younga oraz modułu Poissona. Wynikiem badania jest wytrzymałość rzeczywista badanego fragmentu muru wyrażona w jednostkach ciśnienia. Obecnie nie ma norm regulujących jednoznacznie sposób prowadzenia badania dla obiektów historycznej ruiny. Zapisy dotyczące prowadzenia podobnych badań na obiektach współczesnych znajdują się w krajowych normach oraz instrukcjach wydanych przez instytuty badawcze [źródła].

W celu określenia parametrów wytrzymałości metodą laboratoryjną należy pobrać próbkę z badanego elementu konstrukcji, odpowiednio przygotować a następnie ścisnąć do zniszczenia w prasie hydraulicznej.

Przeprowadzenie badania

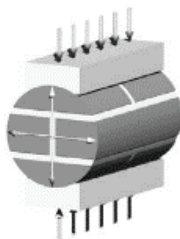
Przed przystąpieniem do badania należy pobrać próbki z elementu. Sposób pobierania próbek i ich przygotowania ma znaczenie na końcowy wynik badania, dlatego

w przypadku prowadzenia porównawczych zaleca się stosowanie identycznych metod. Zgodnie z zestawami norm i przepisów należy pobrać minimum 3 próbki. Z uwagi jednak na dużą różnorodność oraz trudności związane z pobieraniem próbek w obiektach zabytkowych zaleca się pobranie minimum 6 próbek.

Pobieranie próbek (rdzeni) z muru odbywa się przy użyciu wiertnicy z wiertłem koronkowym. Koronka podczas pobierania próbek może być chłodzona cieczą a zawilgocenie materiału będzie wpływało na wynik wytrzymałości. Zaleca się wykonywać próby badawcze po pełnym obeschnięciu muru. Średnica próbki zależna będzie od struktury samego elementu oraz zakładanej precyzji badania (najlepsze wyniki dla rdzeni $\phi 150$ mm). Średnicę należy dobierać tak aby oddać reprezentatywny fragment muru oraz spowodować jak najmniejsze uszkodzenia struktury badanego elementu. Głębokość odwiertu zależna będzie od grubości muru oraz koronki, którą posiadamy. Jeżeli mury nie są zbyt dużej miąższości zaleca się pobieranie próbek z całej grubości muru i badanie części środkowej. W przypadku murów o znacznej miąższości zaleca się pobieranie próbek o 5 cm większych od średnicy wewnętrznej koronki (np. dla koronki $\phi 150$ mm, długość próbki 200 mm). Kilkucentymetrowy zapas wysokości próbki istotny jest z uwagi na częste powierzchniowe uszkodzenia warstwy licowej oraz nierówny przełam podczas jej pobierania. Powierzchnie boczne próbki należy następnie oszlifować tak aby były prostopadłe do powierzchni walcowych i równoległe względem siebie.

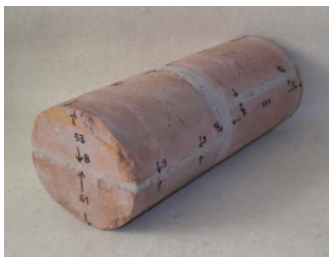
Próbki przygotowane do badania powinny być w proporcjach 1:1 (średnica : wysokość). W przypadku badania wytrzymałości muru a nie jego elementów próbkę należy pobrać w taki sposób aby jak ja dokładniej oddawała kompozyt (zawierała zaprawę oraz materiał murowy). Im widok powierzchni bocznej będzie bardziej symetryczny tym wyniki badania będą bardziej miarodajne. W zależności od wielkości elementów murowych spoina powinna być możliwie blisko środka a osie środkowe powinny tworzyć osie symetrii próbki.

Odpowiednio przygotowane próbki ścisnąć można równoległe lub prostopadle do kierunku obciążenia w ścianie. Kompozyt jest anizotropowy i będzie wykazywał różne parametry materiału zależne od kierunku badania. Zaleca się ścisnąć elementu w kierunku, w którym element ścisłany jest w murze. Schemat próbki wraz ze schematem badania znajduje się poniżej.



Rys. 11 Schemat badania odwiertu rdzeniowego muru¹¹

¹¹ UIC – International Union of Railways: UIC code 778-3R – final draft 2008, Recommendations for the inspection, assessment and maintenance of masonry arch bridges.



Fot. 40 Odwiert przez grubość muru¹²



Fot. 41 Próbkki przygotowane do badania¹³

Odpowiednio przygotowane próbki umieszczamy w prasie hydraulicznej a następnie poddajemy ścisłkaniu z odpowiednim przyrostem siły (N/s). Przyrost siły należy ustawiać indywidualnie w każdym badaniu w zależności od tego jaką strukturę ma badany element. Na grafice poniżej przedstawiono schemat badania wytrzymałości na ścisłkaniu muru oraz przykładowe próbki przygotowane do badania.



Fot. 42 Stanowiska badawcze – prasa hydrauliczna Controls Advantest 9

Wytrzymałość na ścisłkanie f wyrażoną w MPa wylczy się stosując wzór:

$$f = n \times \frac{F}{\varphi \times l}$$

gdzie:

f – siła niszcząca

φ – średnica próbki

l – długość próbki

n – współczynnik korelacji

Dokładność obliczeń do 0,1 MPa.

Współczynnik korelacji na podstawie badań¹⁴ zaleca się przyjmować pomiędzy 1,8 a 2,2. Zależy on od: proporcji próbki, badanej średnicy, smukłości badanego elementu. Przyjmowany indywidualnie na podstawie doświadczenia laboranta lub eksperta.

¹²M. Gruszczyński, P. Matysek, *Ocena wytrzymałości murów ceglanych na podstawie badań odwiertów rdzeniowych*, „Czasopismo Techniczne. Budownictwo”, 2011, R. 108, z. 3-B, s. 57–69

¹³*Ibidem*

¹⁴A. Brencich, E. Sterpi, *Compressive strength of solid clay brick masonry: calibration of experimental tests and theoretical issues*, Structural Analysis of Historical Constructions, New Delhi 2006

Podczas analizy wyników istotne jest również określenie ich odchylenia standardowego. Świadczyć będzie o jednorodności badanego elementu lub dokładności prowadzonego badania.

Sprawozdanie z badania

Sprawozdanie z badania powinno zawierać następujące informacje:

- datę i miejsce pobrania próbek do badania;
- typ, pochodzenie elementu;
- liczbę pobranych próbek;
- datę otrzymania próbek przez laboratorium badawcze;
- szkic próbki, jeśli jest to niezbędne, pokazujący pole obciążanej powierzchni, wielkość i kierunek obciążenia;
- zastosowaną metodę przygotowania powierzchni;
- wilgotność podczas badania (zmierzoną metodą grawimetryczną na próbkach po zniszczeniu);
- obciążenie niszczące w N oraz wymiary każdej próbki w mm;
- wytrzymałość próbek w MPa z dokładnością do 0,1 MPa;
- opis typu zniszczenia dla każdej próbki;
- dokumentację fotograficzną z badania;
- spostrzeżenia jeżeli są.

4.2. Badania cech fizycznych materiałów

W podrozdziale opisane zostały podstawowe badania mające na celu określenie cech wytrzymałościowych, właściwości wilgotnościowych oraz odporności na czynniki środowiskowe.

4.2.1. Badanie wytrzymałości na ściskanie

Badania wytrzymałościowe wykonuje się w celu sprawdzenia, jakiej wielkości siły oddziałujące na element spowodują jego zniszczenie. Typ badań wytrzymałościowych jest dobierany w zależności od późniejszego przeznaczenia i charakteru pracy elementu. Dla elementów o kształcie zbliżonym do sześcianu (elementy murowe, bruk), określa się przede wszystkim wytrzymałość na ściskanie. Dla elementów wydłużonych, (parapety, opaski okienne, nadproża, krawężniki), sprawdza się wytrzymałość na zginanie. W przypadku elementów okładzinowych (płyty elewacyjne), montowanych na kotwach oznacza się siłę, jaką należy przyłożyć do elementów łączących (kotwiących), przy której łącznik zostanie wyrwany razem z kawałkiem płyty.

W obiektach w ruinie badania te są prowadzone zarówno w przypadku materiału historycznego jak i materiałów wprowadzanych podczas prac konserwatorskich i remontowych.

Badania wykonuje się na sześciu próbkach o kształcie zbliżonym do sześcianu i krawędzi ok. 70 mm. Powierzchnie czołowe, które mają być obciążone należy przygotować tak by były płaskie z tolerancją 0,1 mm. Wymiary przekroju poprzecznego do bada-

nia mierzy się z dokładnością do 0,1 mm i stanowią one średnią z dwóch pomiarów wykonanych pod kątem prostym względem siebie, w górnej i dolnej części wysokości h próbki. Średni wymiar boczny służy do obliczenia pola powierzchni przekroju poprzecznego. Wysokość próbki określa się z dokładnością do 1 mm. Próbkę przed ścisaniem są suszone do stałej masy w temperaturze około 70 °C. Następnie po wystygnięciu w eksykatorze są poddawane badaniom w maszynie wytrzymałościowej. Wyjątkiem są badania kamienia do robót hydrotechnicznych (kanały, rynsztoki itp.) – kamienie zostają nasączone wodą w celu symulacji warunków w jakich faktycznie działają na element siły niszczące.

Powierzchnie dociskowe maszyny wytrzymałościowej należy oczyścić. Próbkę ustawia się dokładnie na środku dolnej płyty prasy. Obciążenie maszyny powinno wzrastać w sposób ciągły, ze stałą prędkością wzrostu naprężeń ścisających ($1 \pm 0,5$) MPa/s. Maksymalne obciążenie próbki jest notowane z dokładnością do 1 kN.

Jako wynik badania wytrzymałości próbek na ściskanie przyjmuje się iloraz siły, przy której próbka uległa zniszczeniu do pola powierzchni jej poprzecznego przekroju. Zależność ta jest opisana za pomocą poniższego równania

$$R = \frac{F}{A}$$

gdzie:

R – wytrzymałość na ściskanie [MPa]

F – siła niszcząca [kN]

A – powierzchnia przekroju [mm^2]

Opis badania zgodnie z normą: PN-EN 1926:2007: Metody badań kamienia naturalnego – Oznaczanie wytrzymałości na ściskanie.

Badania dla zapraw (w zależności od przeznaczenia badanych materiałów) należy prowadzić zgodnie z normą: PN-B-04500:1985 *Zaprawy budowlane – Badania cech fizycznych i wytrzymałościowych* lub PN-EN 13892-2:2004 *Metody badania materiałów na podkłady podłogowe – Część 2: Oznaczanie wytrzymałości na zginanie i ściskanie*. Badanie wykonywane jest na połówkach próbek do badania wytrzymałości na zginanie 160x40x40 mm. Badania dla cegieł należy prowadzić zgodnie z normą: PN-EN 772-1 + A1: 2015-10 *Metody badań elementów murowych – Część 1: Określenie wytrzymałości na ściskanie*. Badania prowadzi się na elementach murowych z zaprawą wyrównującą lub na dociętych i szlifowanych próbkach bez zaprawy wyrównującej. Oznaczenie wykonywane jest w 6 próbach.

Tab. 5 Zestawienie wyników pomiarów próbek przeznaczonych do badania wytrzymałości na ściskanie

Nr próbki	Masa próbek przed wysuszeniem m_1 [g]	Masa próbek wysuszonej do stałej masy m_2 [g]	Wymiar boczny a [mm]	Wymiar boczny b [mm]	Wysokość h_1 [mm]	Wysokość h_2 [mm]	Wysokość średnia h_{sr} [mm]	Pole przekroju A [mm^2]
1.								
2.								

Tab. 6 Zestawienie uzyskanych wyników badania wytrzymałości na ściskanie

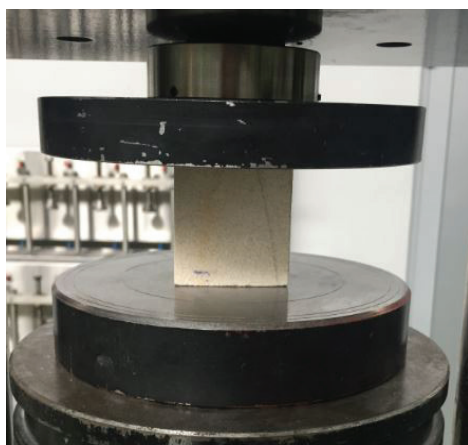
Ściskanie			Obliczona wytrzymałość na ściskanie poszczególnych próbek R [MPa]	Średnia wytrzymałość na ściskanie [MPa]
Obciążenie F [kN]	Naprężenia [MPa]	Czas t [s]		



Fot. 43 Próbkki piaskowca przygotowane do badania wytrzymałości na ściskanie



Fot. 44 Maszyna wytrzymałościowa z nadstawką do badania



Fot. 45 Proces ściskania próbki z piaskowca



Fot. 46 Widok zniszczonej próbki po zakończeniu badania

4.2.2. Badanie wytrzymałości na zginanie

Badania prowadzone są w oparciu o normę PN-EN 1015-11 oraz wytyczne w niej zawarte. Do oznaczenia wykorzystuje się trzy próbki prostopadłościennne, które osiągnęły normową wytrzymałość, czyli próbki dojrzewające przez 28 dni od daty ich zaformowania. Wymiary próbek powinny wynosić 40 x 40 x 160 mm. Każdą z próbek należy w odpowiedni i czytelny sposób oznaczyć. Oznaczenie wytrzymałości beleczek na zginanie wykonuje się poprzez ich obciążenie w 3 punktach, aż do momentu ich przełamania. Przed przystąpieniem do umieszczenia próbek w maszynie przeznaczonej do wykonania badania, należy oczyścić ich powierzchnię z zanieczyszczeń w postaci wolnych ziaren oraz kurzu.

Następnie układa się próbki w maszynie wytrzymałościowej na specjalnych podporach walcowych, po czym przykłada się obciążenie zginające. Obciążenie to należy zwiększać jednostajnie od 10 do 50 N/s. Oznaczenie jest zakończone w momencie zniszczenia beleczki tj. w momencie jej przełamania. Maksymalne przyłożone obciążenie jest traktowane jako obciążenie niszczące. Połówki beleczek pozostałe po wykonaniu badania zostały odłożone w celu użycia ich do badania wytrzymałości na ściskanie. Wytrzymałość na zginanie pojedynczej próbki prostopadłościennnej wyznacza się na podstawie poniższego wzoru:

$$f = 1,5 \frac{F \cdot l}{b \cdot d^2}$$

gdzie:

b, d, l – wewnętrzne wymiary formy, w której wykonano beleczki;
 F – maksymalna siła powodująca zniszczenie próbki.

Uzyskane wyniki powinny być podane z dokładnością wynoszącą 0,05 N/mm². Należy również obliczyć wartość średnią wytrzymałości na zginanie.

Opis badania zgodnie z normą: PN-EN 1015-11 *Metody badań zapraw do murów. Określenie wytrzymałości na zginanie i ściskanie stwardniałej zaprawy.*

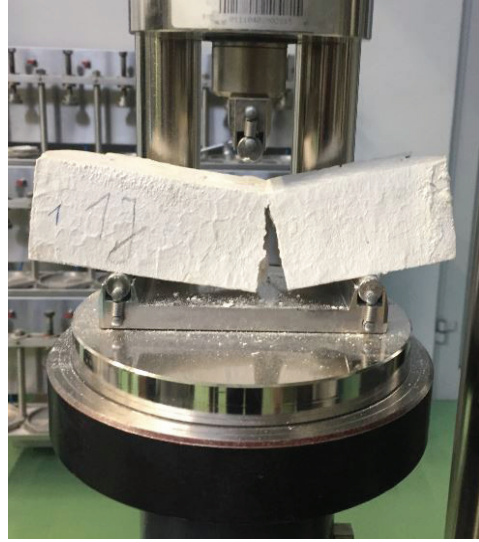
W przypadku badań zapraw stosowanych jako posadzki w obiektach zastosowanie ma norma: PN-EN 13892-2:2004 *Metody badania materiałów na podkłady podłogowe – Część 2: Oznaczanie wytrzymałości na zginanie i ściskanie.*

Tab. 7 Zestawienie wyników badania wytrzymałości na rozciąganie zapraw

Nr próbki	Poszczególne wymiary boków próbek			Zginanie			Obliczona wytrzymałość na zginanie poszczególnych próbek	Średnia wytrzymałość na zginanie [MPa]
	Wymiar boczny a [mm]	Wymiar boczny b [mm]	Długość l [mm]	Obciążenie F [N]	Naprężenia [MPa]	Czas t [s]		
1.								
2.								



Fot. 47 Formowanie próbek zapraw



Fot. 48 Proces badania próbki zaprawy konserwatorskiej w maszynie wytrzymałościowej



Fot. 49 Widok próbki po badaniu wytrzymałości na zginanie

4.2.3. Oznaczanie nasiąkliwości przy ciśnieniu atmosferycznym

Przez nasiąkliwość materiału rozumiemy jego zdolność do całkowitego pochłaniania wody przez pory i kapilary. Określa się ją jako procentową zawartość wody w stosunku do masy materiału lub jego objętości. W praktyce stanowi maksymalną wilgotność materiału.

Materiały o porach zamkniętych lub ich przewodze oraz materiały o małej porowatości wykazują bardzo małą nasiąkliwość. W naturalnych warunkach woda wypiera z porów materiału tylko część powietrza. W porach bardzo małych zastępuje około 30% objętości powietrza, w dużych dochodzi do 70%.

Nasiąkliwość materiałów budowlanych waha się od 0% masy (szkło, metale) do powyżej 200% masy (drewno lub niektóre bardzo materiały porowate).

$$n_m = \frac{m_n - m_s}{m_s} 100\% = \frac{m_{wody}}{m_s} 100\%$$

gdzie:

n_m – nasiąkliwość masowa [%],

m_n – masa próbki w stanie nasycenia wodą [kg, g],

m_s – masa suchej próbki [kg, g],

m_{wody} – masa wody znajdującej się w próbce [kg, g].

Nasiąkliwość objętościowa no [%] oznacza stosunek objętości wody wchłoniętej przez n próbkę do objętości próbki w stanie suchym.

$$n_o = \frac{m_n - m_s}{V} 100\%$$

gdzie:

n_o – nasiąkliwość objętościowa [%],

m_n – masa próbki w stanie nasycenia wodą [kg, g],

m_s – masa suchej próbki [kg, g],

V – objętość próbki w stanie suchym [m^3 , cm^3].

Badanie nasiąkliwości kamienia naturalnego przy ciśnieniu atmosferycznym

Badanie wykonuje się na sześciu próbkach o kształcie zbliżonym do sześcianu o krawędzi ok. 70 mm. Próbki do badania należy wysuszyć do stałej masy w temperaturze ok. 70 °C. Po wysuszeniu próbki do badania należy zważyć z dokładnością do 0,01 g. Następnie przechowuje się je w eksykatorze do osiągnięcia temperatury ok. 20 °C.

Kolejną czynnością jest umieszczenie materiału w pojemniku na podkładkach. Każda próbka powinna być ułożona w odległości co najmniej 15 mm od sąsiednich próbek. Następnie dolewa się wodę wodociągową o temperaturze ok. 20 °C do połowy wysokości próbek. Po czasie t_0 ok. 60 min uzupełnia się poziom wody do 3/4 wysokości próbek do badania. Po czasie t_0 ok. 120 min dolewa się wodę do całkowitego zanurzenia próbek pod wodą na głębokość ok. 25 mm.

Po czasie t_0 ok. 48 h próbki wyjmują się z wody, szybko wyciera wilgotną ściereczką, a następnie waży z dokładnością do 0,01 g. Następnie ponownie zanurza się próbki w wodzie i kontynuuje badanie. Po każdym 24 h próbki wyjmują się z wody, wyciera wilgotną ściereczką i waży w ciągu 1 minuty z dokładnością do 0,01 g. Ważenie należy zakończyć po osiągnięciu stałej masy próbek.

Nasiąkliwość wodą przy ciśnieniu atmosferycznym A_b , jest obliczana z równania:

$$A_b = \frac{m_s - m_d}{m_s} \cdot 100$$

Wynik podaje się w procentach z zaokrągleniem do 0,1%,
gdzie:

m_s – masa próbki nasyconej wodą [g],

m_d – masa próbki suchej [g],

A_b – nasiąkliwość przy ciśnieniu atmosferycznym [%].

Badanie zgodnie z normą Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie nasiąkliwości przy ciśnieniu atmosferycznym – PN-EN 13755.



Fot. 50 Badanie nasiąkliwości kapilarnej

4.2.4. Oznaczenie współczynnika nasiąkliwości kapilarnej

Większość materiałów budowlanych, w tym kamienie naturalne, zaprawy i ceramika to materiały porowate, które mają zdolność podciągania wody. Proces podciągania wody określane jest kapilarnością. Naczynia włoskowate (kapilar) w niektórych materiałach powodują podciąganie wody w wewnętrznych strukturach tych materiałów w momencie ich kontaktu z wilgotnym podłożem. Wysokość podciągania kapilarnego jest zależna do kąta zwilżania (rodzaju cieczy) i średnicy kapilary (wielkości porów). Czym mniejsza średnica porów tym podciąganie kapilarne jest większe. Podciąganie kapilarne jest jednym z głównych źródeł zawilgocenia historycznych ruin.

Celem badania jest określenie podatności badanych materiałów (murowych lub zapraw) na podciąganie wody w ich strukturze. Badania prowadzone są zarówno w przypadku materiału historycznego pobranego z obiektu jak i nowych materiałów, które mają być wprowadzone w tkankę historyczną. Istotnym jest aby wprowadzone materiały (przemurowania, uzupełnienia) miały podobne właściwości kapilarne jak materiał

historyczny. Jest to szczególnie istotnym w przypadku prac prowadzonych w warstwach licowych. W przypadku dużych różnic w kapilarności może dojść do sytuacji gdzie nowo wprowadzony materiał będzie wyraźnie wyżej podciągać wodę z gruntu lub ulegać dużemu zawilgoceniu od opadów atmosferycznych. W konsekwencji prowadzić to będzie do szybszej degradacji warstw licowych uzupełnień, występowania plam wilgoci, szybszego rozwoju glonów oraz innych organizmów powodujących korozję biologiczną. W stosunkowo krótkim czasie pogorszy się również estetyka fragmentów naprawianych.

Oznaczenie współczynnika nasiąkliwości kapilarnej kamienia naturalnego

Próbki do badania powinny mieć szorstką powierzchnię cięcia lub mogą mieć jedną lub dwie powierzchnie polerowane lub łupane. Powierzchnie te należy umieścić pionowo (powierzchnia obrabiana nigdy nie może być zanurzona).

Badane próbki powinny mieć kształt sześcianów o boku (70 ± 5) mm lub (50 ± 5) mm, lub walców, których średnica i wysokość powinny być równe (70 ± 5) mm albo (50 ± 5) mm. Badane próbki należy suszyć do stałej masy, w wentylowanej suszarce w temperaturze (70 ± 5) °C. Stałą masę osiąga się wtedy, gdy różnica pomiędzy dwoma kolejnymi ważeniami w czasie (24 ± 2) h nie jest większa niż 0,1% masy próbki. Probki powinny być przechowywane w eksykatorze w temperaturze pokojowej (20 ± 5) °C.

Po wysuszeniu zważyć próbki (md) z dokładnością do 0,01 g i obliczyć powierzchnię zanurzonej podstawy przez pomiar dwóch jej środkowych z dokładnością do 0,1 mm. Wyrazić powierzchnię w metrach kwadratowych. Umieścić próbki w kuwecie, płaszczyznami anizotropii w kierunku wznoszenia wody. Zanurzyć podstawę próbki w wodzie na głębokość (3 ± 1) mm. Uruchomić stoper. Utrzymywać stały poziom wody w trakcie całego badania, dodając jej w razie potrzeby, przykryć kuwetę, aby uniknąć parowania wilgoci z próbek. Początkowo, po czasie zanurzania bardzo krótkim, później dłuższym, wyjmować kolejno próbki, delikatnie osuszać wilgotną ściereczką zanurzoną część każdej próbki, aż do usunięcia kropelek wody i natychmiast zważyć z dokładnością do 0,01 g, następnie włożyć je ponownie do kuwety. Notować czas, który upłynął od początku badania do momentu każdego ważenia.

Dla bardzo nasiąkliwego kamienia, odpowiednim czasem f , są: 1, 3, 5, 10, 15, 30, 60, 480 i 1440 min. Czasy te powinny być mierzone z dokładnością do 5%. Konieczne jest przeprowadzenie minimum 7 pomiarów. Badanie uznaje się za zakończone, kiedy różnica pomiędzy dwoma kolejnymi ważeniami jest nie większa niż 1% masy wody pochłoniętej przez próbkę.

Jeżeli współczynnik korelacji między zmierzonymi punktami w pierwszej części wykresu i prostą regresji tej pierwszej części jest odpowiednio większy niż 0,90 (wtedy, kiedy co najmniej pięć pomiarów wzięto do uzyskania pierwszej części wykresu) lub większy niż 0,95 (gdy wzięto tylko cztery próbki), to współczynnik nasiąkliwości kapilarnej C_1 lub C_2 (w gramach na metr kwadratowy i na pierwiastek kwadratowy z czasu w sekundach) jest wyrażony jako nachylenie C_1 do linii regresji C_2 .

Może być obliczone jako stosunek między rzędną i odciętą w każdym punkcie tej linii, zgodnie z następującym wzorem:

$$C_1 \text{ lub } C_2 = \frac{m_i - m_d}{A \cdot \sqrt{t_i}}$$

gdzie:

- m_d – masa suchej próbki do badania, w gramach.
- m_i – kolejne masy próbki w trakcie badania, w gramach;
- A – powierzchnia zanurzona w wodzie, w metrach kwadratowych;
- t_i – czas, który upłynął od początku badania do momentu, w którym wykonano pomiar kolejnej masy próbki m_i w sekundach;
- C_1 – współczynnik nasiąkliwości kapilarnej wodą, zmierzony w kierunku prostopadłym do płaszczyzny anizotropii kamienia, w gramach na metr kwadratowy i na pierwiastek kwadratowy z sekund;
- C_2 – współczynnik nasiąkliwości kapilarnej wodą, zmierzony w kierunku równoległym do płaszczyzny kamienia, w gramach na metr kwadratowy i na pierwiastek kwadratowy sekundy.

Opis badania zgodnie z normą: zgodnie z normą nr: PN-EN 1925:2001 *Metody badań kamienia naturalnego – Oznaczanie współczynnika nasiąkliwości kapilarnej*.

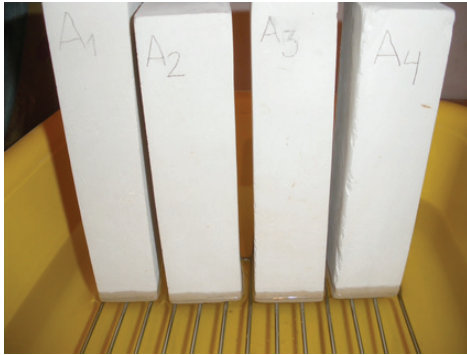
Badania dla zapraw należy prowadzić zgodnie z normą: PN-EN 1015-18:2003 *Metody badań zapraw do murów – Część 18: Określenie współczynnika absorpcji wody spowodowanej podciąganiem kapilarnym stwardniałej zaprawy*. Wymiar próbek do badania 160x40x40 mm minimalna liczba próbek 3.

Badania dla cegieł należy prowadzić zgodnie z normą: PN-EN 772-21:2011 *Metody badań elementów murowych – Część 21: Określanie absorpcji wody ceramicznych i sili-katowych elementów murowych przez absorpcję zimnej wody* oraz PN-EN 772-7:2000 *Metody badań elementów murowych – Określenie absorpcji wody przez elementy murowe ceramiczne stosowane w warstwach odpornych na wilgoć, za pomocą gotowania w wodzie*. Badania prowadzi się na elementach murowych, a oznaczenie wykonywane jest w 6 próbach.

Tab. 8 Obliczenia współczynnika nasiąkliwości kapilarnej dla pojedynczej próbki kamienia naturalnego

m_d [g]	m_i [g]	A [m ²]	t_i [s]	C_1 [g/m ² s ^{0,5}]	C_2 [g/m ² s ^{0,5}]	Y [g/m ²]	X [s ^{0,5}]

gdzie: m_d – masa suchej próbki do badania [g], m_i – kolejne masy próbki do badania [g], A – powierzchnia zanurzona w wodzie [m²], t_i – czas, który upłynął od początku badania do momentu, w którym wykonano pomiar kolejnej masy próbki m_i [s], C_1 – współczynnik nasiąkliwości kapilarnej wodą, zmierzony w kierunku prostopadłym do płaszczyzny anizotropii kamienia [g/m²s^{0,5}], C_2 – współczynnik nasiąkliwości kapilarnej wodą, zmierzony w kierunku równoległym do płaszczyzny anizotropii kamienia [g/m²s^{0,5}], Y – nasiąkliwość wodą w [g/m²], X – pierwiastek kwadratowy z czasu w [s^{0,5}].



Fot. 51 Oznaczenie współczynnika nasiąkliwości kapilarnej dla opoki wapińskiej – początek badania



Fot. 52 Oznaczenie współczynnika nasiąkliwości kapilarnej dla opoki wapińskiej – koniec badania

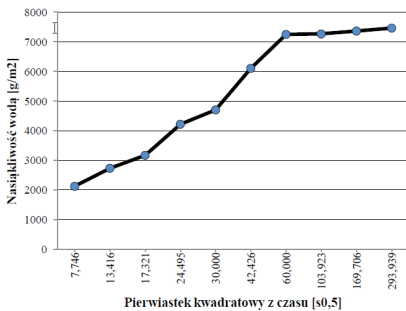


Fot. 53 Oznaczenie współczynnika nasiąkliwości kapilarnej dla zapraw wapiennych – początek badania

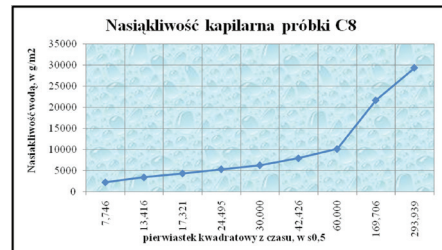


Fot. 54 Oznaczenie współczynnika nasiąkliwości kapilarnej dla piaskowca – początek badania

Kapilarność próbki nr 1



Rys. 12 Przykładowy wykres nasiąkliwości kapilarnej piaskowca



Rys. 13 Przykładowy wykres nasiąkliwości kapilarnej opoki wapińskiej

4.2.5. Oznaczenie odporności na zamarzanie

Próbki prostopadłościennie o wymiarach 50x50x300 mm suszy się do stałej masy w temp. 70 ± 5 °C. Przed badaniem mrozodporności należy zanotować masy próbek przed zanurzeniem w wodzie, masę próbki nasyconej po zanurzeniu w wodzie jak i masę próbki w wodzie.

Badanie przeprowadzamy aż próbki zaklasyfikuje się jako uszkodzone lub jeśli osiągną maksymalną liczbę cykli 240. Każdy cykl składa się z sześciu godzin zamrażania w powietrzu w temperaturze od -8 do -12 °C po czym następuje sześciogodzinne rozmrażanie w wodzie w temperaturze od +5 do +20 °C. Po każdym 14 cyklach należy przeprowadzić ocenę wizualną i pomiar ich masy w powietrzu i masy w wodzie.

Przy ocenie wizualnej stosujemy następującą skalę: 0 – próbka do badań nie naruszona. Osiągnięcie punktu 3 skali powoduje zaklasyfikowanie próbki jako zniszczonej.

Do pomiaru objętości stosujemy następujący wzór :

$$\Delta V_b = \frac{((M_{so} - M_{h0}) - (M_{sn} - M_{hn})) \times 100}{(M_{so} - M_{h0})}$$

gdzie:

M_{c0} – masa wysuszonej próbki do badania przed zanurzeniu w wodzie, przed zamrożeniem w [g];

M_{so} – masa próbki do badania w wodzie przed zamrożeniem w [g];

M_{ho} – masa próbki do badania w wodzie przed zamrożeniem w [g];

M_{sn} – masa nasyconej próbki po n cyklach w [g];

M_{hn} – masa próbki do badania w wodzie po n cyklach w [g];

ΔV_b – zmiana objętości próbki po n cyklach w [%].

Próbkę klasyfikujemy jako zniszczoną gdy ubytek objętości osiąga 1

Badanie zostało przeprowadzone zgodnie z normą: PN-EN 12371: *Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczenie mrozoodporności.*

4.2.6. Odporność na krystalizację soli

Badanie normowe dotyczy obciążania próbek roztworem soli siarczanowych Na_2SO_4 (siarczan sodu). Autor pracy zdecydował o przeprowadzeniu badań w szerszym zakresie, badając odporność na krystalizację soli chlorkowych i azotanowych.

Próbki sześciennie o boku (40 mm) powinny być wycięte piłą diamentową, a jedna z powierzchni powinna być oszlifowana, cały luźny materiał powinien być zmyty z powierzchni próbki pod bieżącą wodą. Próbki do badania należy wysuszyć do stałej masy w suszarce w temp. 105 °C. Próbki należy trwale oznakować i zważyć z dokładnością do 0,01g.

Badanie składa się z 15 cykli, na jeden cykl składa się 2 godzinne nasiąkanie w roztworze soli i co najmniej 16 godzinne suszenie w suszarce w temp. 105 °C .

- Wysuszone próbki należy umieścić w pojemniku i pokryć 14% roztworem soli do głębokości 10 mm nad powierzchnią próbki. Minimalna odległość między próbkami ma wynosić 10 mm, a brzegami pojemnika 20 mm. Próbki należy nasączać przez 2 godziny (temp. 20 °C) pod przykryciem, aby uniknąć parowania.
- Po nasączeniu próbki umieścić w suszarce na co najmniej 16 godzin w temp. 105 °C. W początkowym etapie suszenia, aby uzyskać dużą wilgotność względną na-

leży (jeszcze przed włożeniem próbek) umieścić w zimnej suszarce kuwety z wodą i włączenie ogrzewania na 30 minut.

- Po każdym z 15 cykli próbki przechowuje się w wodzie o temp. 23 °C przez 24 godziny, następnie suszy do stałej masy i waży.

Wyniki należy przedstawić stosując wzór:

$$\Delta M = \frac{M_1 - M_{d1}}{M_d} \times 100$$

gdzie:

M_d – masa suchej próbki do badania [g],

M_{d1} – masa wysuszonej i oznakowanej próbki do badania przed pierwszym cyklem [g],

M_1 – masa wysuszonej i oznakowanej próbki do badania po 15 cyklach [g],

ΔM – względna różnica mas przed i po badaniu (strata lub przyrost masy) [%].

W przypadku gdy próbka uległa zniszczeniu lub pękła w czasie badania, należy podać całkowitą liczbę cykli.

Badanie zostało przeprowadzone zgodnie z normą: PN-EN 12370: Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczenie odporności na krystalizację soli. Badania wykonano po 180 dniach od wykonanej hydrofobizacji.

4.3. Badanie wilgotności elementów konstrukcji

Do podstawowych źródeł wilgoci zasilających przestrzeń murów zaliczamy wodę: znajdującą się w gruncie podciąganą kapilarnie, pochodzącą z opadów atmosferycznych, wchłanianą higroskopijnie oraz kondensującą wewnątrz materiałów i na ich powierzchni. Inne źródła wilgoci występujące w obiektach kubaturowych, a więc woda technologicznie wprowadzana do obiektu, pochodząca z awarii instalacji oraz generowana przez człowieka w przypadku murów obiektów w ruinie nie mają większego znaczenia. W przypadku murów obiektów w postaci trwałej ruiny największy wpływ na procesy degradacyjne ma woda gruntowa i opadowa.

Woda gruntowa. Woda pochodząca z gruntu zagraża nie tylko podziemnym częściom obiektu. Może ono zostać przeniesione na wyższe, leżące ponad ziemią części muru na skutek zjawiska podciągania kapilarnego. Podciąganie kapilarne polega na transportowaniu wody i powolnym nasiąkaniu obszarów materiału niemających bezpośredniego kontaktu ze źródłem wilgoci. Podciąganie kapilarne z fundamentów może być powodem zawilgocenia murów do wysokości kilku metrów. Wysokość podciągania kapilarnego zależy od budowy materiału przede wszystkim od jego porowatości i struktury porów i kapilar. Wspomniana wysokość jest odwrotnie proporcjonalna do średnicy naczyń. Oznacza to, że w materiałach drobno porowatych o niewielkiej średnicy porów i kapilar podciąganie jest najwyższe. Dla grubych murów wzniesionych z cegły ceramicznej może sięgać nawet kilku metrów powyżej poziomu zwierciadła. W murach z kamienia wysokość podciągania uzależniona jest przede wszystkim od rodzaju skały. W przypadku skał osadowych (wapienie, piaskowce) jest ono zdecydowanie najwyż-

sze. W przypadku skał magmowych kapilarne podciąganie jest minimalne lub też nie występuje. Nie oznacza to, że w murach ze skał magmowych, czy też metamorficznych pochodzenia magmowego, nie ma zjawiska podciągania kapilarnego. W związku z tym, że mur składa się również z zaprawy woda jest podciągana w wyższe partie muru siecią spoin.

Opady atmosferyczne. W całkowitym bilansie wody znajdującej się w najbliższym otoczeniu obiektu największą ilość stanowią wody opadowe. Mogą one doprowadzać do zawilgocenia muru w sposób bezpośredni i pośredni. Z bezpośrednim zawilgoeniem mamy do czynienia gdy woda opadowa trafi na odsłonięte elementy (np.: korona murów, powierzchnie boczne). Do zawilgocenia w sposób pośredni dochodzi gdy spływające opady zalewają mury w przyziemi lub też pojawia się tzw. woda rozbryzgowa.

Największe zniszczenia obserwujemy w przyziemiu (brak izolacji), na koronie murów (w przypadku braku elementów osłaniających). Spływająca woda prowadzi również do uszkodzeń lica murów, efekt ten jest szczególnie widoczny w murach o zmiennej grubości. Przemieszczanie się wilgoci w murze w pierwszym etapie powoduje rozpuszczanie substancji wiążących zapraw i uszkodzenia spoin lub też ich całkowitego wymycia. Proces ten powoduje przede wszystkim woda opadowa spływająca w kierunku gruntu. W konsekwencji następuje obniżenie nośności pozbawionych spoin partii muru. Kolejnym etapem jest systematyczne oddzielanie się materiału murowego (cegły, kamienia) od muru.

Zawilgocone materiały ulegają przyspieszonemu niszczeniu również na skutek cyklicznego zamrażania i odmrażania wody zawartej w porach i kapilarach. Woda znajdująca się w porach materiały i kawernach muru zamarzając zwiększa swoją objętość, co powoduje zniszczenie materiału. Degradacja na skutek tzw. szkód mrozowych jest szczególnie widoczna na elewacjach południowych obiektów ze względu na wielokrotne powtarzanie się procesów zamrażania i odmrażania ciągu jednego sezonu. Zawilgoenie materiałów powoduje również przyspieszenie korozji chemicznej elementów metalowych, które mogą znajdować się w murach.

Badania metodą grawimetryczną

Celem badania jest określenie stanu wilgotnościowego przegród w obiekcie. Oznaczenia pozwalają na uzyskanie informacji o skali i zakresie zawilgoceń, umożliwiając określenie źródła zawilgocenia. Przeprowadzone na różnych głębokościach i wysokościach dają informacje dotyczące rozkładu wilgotności w strukturze muru.

W zależności od potrzeb badania mogą mieć charakter poznawczy (badania naukowe), decydować o zakresie prac naprawczych (faza przedprojektowa remontu), informować o możliwości wbudowania kolejnych materiałów (prace wykończeniowe) lub stanowić dowód (sprawy roszczeniowe i sądowe).

W Polsce pomiar bezpośredni (grawimetryczny, laboratoryjny) uważany jest, za jedyny miarodajny sposób pomiaru wilgoci. Pomimo prostoty samego oznaczenia wilgotności masowej i dostępności metod badawczych, problemem pozostaje cały szereg czynności związanych z uzyskaniem wiarygodnych wyników. Wpływ na ich wiarygod-

ność mają: metoda poboru materiału, głębokości i wysokości próbkowania, ilości punktów pomiarowych oraz interpretacja uzyskanych wyników.

Pierwszym z problemów jest sposób pozyskiwania materiału do badań. Nie zaleca się pobierania próbek przy użyciu urządzeń wierzących, ze względu na przesuszenie materiału do badań. W źródłach literaturowych zaleca się odkuwanie lub stosowanie wybijaaków rurowych (dorników). W wielu obiektach obydwa sposoby są trudne lub niemożliwe do zastosowania. Przy próbkowaniu na większych głębokościach muru podczas odkuwania uszkodzeniu uległby duży fragment muru. Zastosowanie wybijaaków rurowych ogranicza się jedynie do poboru próbek na niewielkiej głębokości i dotyczy raczej materiałów o niskiej wytrzymałości. Przy pobieraniu z dużej głębokości problemem jest usunięcie wybijaaka z materiałem z przegrody. Dużym ułatwieniem jest wstępne nawiercenie otworu i wbijanie dornika o większej średnicy w miejscu wykonanego odwiertu. W takim przypadku próbka powinna zostać pobrana po upływie kilku-kilkunastu godzin od wykonania odwiertu. Czas ten jest niezbędny na wyrównanie wilgotności w miejscu prowadzonego próbkowania.

Najprostszym z sposobów i prawdopodobnie najczęściej stosowanym jest (niezalecane) wiercenie i pobieranie zwierciny do badań. Metoda ta niesie za sobą błąd związany ze zmniejszeniem wartości uzyskanych wyników. Podczas wiercenia wiertło rozgrzewa się i następuje proces odparowania wody. W zależności od prędkości wiercenia, użytego wiertła (średnica i stan ostrza) oraz materiału, temperatura w otworze może mieć nawet kilkadziesiąt stopni (wg badań autorów). Wyraźnie mniejsze błędy pojawiają się przy stosowaniu wiercenia wolnoobrotowego lub wiertnic z koronami niechłodzonymi wodą. Przy wierceniu wolnoobrotowym ilość ciepła powodowanego tarcieniem jest znacznie mniejsza niż przy odwiertach szybkoobrotowych. Stosowanie urządzeń z równoczesnym chłodzeniem wodą wyklucza charakter badań, natomiast korony niechłodzone ulegają szybkiemu zużyciu i ich stosowanie ogranicza się raczej do materiałów o niskich wytrzymałościach.

W związku z tym bez względu na technikę odwiertów podczas pobierania materiału do badań wilgotnościowych dochodzi do przesuszenia zwierciny. Ubytek masy próbki wilgotnej powinien zostać uwzględniony podczas obliczeń wilgotności.

Kolejnym istotnym problemem jest głębokość i wysokość, z jakiej powinny być pobierane próbki. W związku z tym, że rozkład wilgotności w murze nie jest liniowy, na różnej głębokości oczekiwać należy różnic w wynikach. Otwartym pozostaje pytanie czy ze względu na niejednorodność rozkładu pobierać należy kilka próbek z różnych głębokości, czy też jedną reprezentatywną dla całej przegrody. Źródła polskojęzyczne mówią o jednej pobieranej na różnych głębokościach i wysokości próbkowania 0,5 m nad poziomem posadzki. W przypadku zaleceń zagranicznych mowa jest o trzech pobranych z różnej głębokości (trzy profile głębokości) i trzech punktach wysokościowych na jednej osi. W zależności od podejścia można, więc w obrębie niewielkiego obszaru przegrody pobrać jedną lub 9 próbek.

Próbując ograniczyć dużą liczbę pobieranych próbek i jednocześnie uzyskać potrzebne informacje autorzy w swoich badaniach przyjmuje minimum dwa punkty na

osi, a ilość profili głębokościowych uzależnia od rodzaju badanej przegrody. Przyjmowanie minimum dwóch punktów na różnej wysokości pozwala na określenie wysokości podciągania wody w murach ponad poziomem terenu. W przypadku murów piwnicznych ułatwia określenie źródła wody powodującej zawilgocenie. Z reguły z muru próbki pobierane są tuż nad poziomem posadzki (wewnątrz obiektu) lub terenu (na zewnątrz) oraz przynajmniej jedna powyżej pierwszego (np. na wysokości 1 m).

Kolejnym problemem podczas prowadzonych badań jest przyjęcie miarodajnej liczby próbek z obiektu. Liczba ta jest uzależniona od wielu czynników, a do najważniejszych można zaliczyć: gabaryty badanego obiektu, sposób jego posadowienia, powierzchnię podpiwniczenia, jednorodność materiałową i konstrukcyjną ścian, stan przegród oraz cel wykonywanych badań.

Na podstawie doświadczeń związanych z badaniami wilgotności obiektów określono podstawowe zasady poboru materiału do badań.

- Próbkę pobierane powinny być z głębokości $1/3$ – $1/4$ grubości muru. Materiał do badań musi pochodzić z całej długości otworu.
- Podczas próbkowania nie można przegrzać pobieranego materiału.
- W celu określenia rozkładu zawilgocenie w zależności od wysokości muru badanie należy wykonać w poziomie posadzki (wewnątrz obiektu) lub terenu (na zewnątrz) oraz przynajmniej jeden pomiar powyżej pierwszego (np. na wysokości 1 m). W miejscach gdzie wysokość została zmieniona każdorazowo należy dokonać jej pomiaru.
- Zwiercinę należy umieścić w szczelnym opakowaniu i w przypadku konieczności transportu przechowywać w lodówce, (jeżeli oznaczenie wilgotności wykonywane jest w dłuższym okresie od momentu pobrania próbek). W przypadku kilkudniowych badań na obiekcie próbki można zamrozić i w takim stanie przewozić do laboratorium.
- Otwory, z których pobierany jest materiał do badań należy uzupełnić materiałem zgodnym z pobranym z muru.
- Należy wykonać dodatkową dokumentację fotograficzną miejsc poboru. Umożliwi to późniejsze naniesienie punktów na dokumentację rysunkową.

Metodę wykonania oznaczenia wilgotności precyzuje norma PN-EN ISO 12570 *Ciepłno-wilgotnościowe właściwości materiałów i wyrobów budowlanych. Określanie wilgotności przez suszenie w podwyższonej temperaturze*.

Przed suszeniem należy zważyć próbki do badań z dokładnością do 0,1% ich masy. Następnie należy suszyć próbki do stałej masy w temperaturze określonej w stosownej normie wyrobu. Stała masa jest osiągnięta, gdy zmiana pomiędzy trzema kolejnymi ważeniami wykonanymi w ciągu 24 h wynosi mniej niż 0,1% całkowitej masy. Próbkę należy studzić w ekssykatorze i ważyć je po osiągnięciu temperatury od 30 °C do 40 °C z tą samą dokładnością jak opisano wyżej. Próbkę waży się przed ich całkowitym wystudzeniem, aby zminimalizować powtórna absorpcję wilgoci.

Wilgotność masową oznacza się zgodnie ze wzorem:

$$w_m = \frac{m_w - m_s}{m_s} \cdot 100\% = \frac{m_{wody}}{m_s} \cdot 100\%$$

gdzie:

- w_m – wilgotność masowa [%],
- m_w – masa próbki wilgotnej [kg, g],
- m_s – masa próbki o wysuszenia do masy stałej [kg, g],
- m_{wody} – masa wody znajdującej się w próbce [kg, g].

W większości opracowań traktujących o problematyce badań wilgotnościowych pojawia się (słuszna zresztą) informacja o braku norm określających dopuszczalne zawilgocenie materiałów budowlanych. Na chwilę obecną informacje wspomagające interpretację uzyskanych wyników pochodzą z kilku różnych źródeł. Zdecydowanie najlepiej sytuacja wygląda, jeżeli chodzi o wymagania dotyczące podłoży, na których wykonywane mają być określone roboty budowlane. Informacje dotyczące tych wymagań znajdują się w „warunkach technicznych wykonania i odbioru robót budowlanych” czy też w kartach charakterystyki, aprobatkach, certyfikatach wbudowywanych produktów.

Przy interpretacji wyników badań wilgotności masowej przegród budynku pomocnymi są dwie zamieszczone poniżej tabele. Pierwsza z nich pochodzi z nieobowiązującej już normy PN-82/B-02020 *Ochrona cieplna budynków* i podaje dopuszczalne wartości wilgotności masowej materiałów murowych. Zamieszczone dane podają wartość wilgotności w stanie tzw. suchym oraz jej maksymalny przyrost. W sumie uzyskana wartość informuje jedynie o wartości, przy której mur przestaje być „suchy”.

Tab. 9 Dopuszczalne wilgotności masowej materiałów w zewnętrznych przegrodach budowlanych (fragment tabeli normy PN-82/B-02020 *Ochrona cieplna budynków*)

Lp.	Rodzaj materiału lub przegrody	Wilgotność przed okresem zawilgocenia [%]	Dopuszczalny przyrost wilgotności [%]
1.	Ściana z cegły ceramicznej	1,5	1,5
2.	Ściana z pustaków ceramicznych	1	2
3.	Ściana z cegły silikatowej	3	2
4.	Beton komórkowy	3	4

Dokładniejsze informacje zawiera druga z tabel. Kolejnym stopniom zawilgocenia przyporządkowano zakresy wilgotności oraz opis muru. Tabela opracowana została jedynie dla murów z cegły ceramicznej i ze zrozumiałych względów jej automatyczne stosowanie dla murów z innych materiałów jest niemożliwe.

Tab. 10 Stopnie zawilgocenia murów

Stopień	Wilgotność masowa [%]		Opis
	Cegła ceramiczna	Wapień o strukturze porowatej	
I	0–3	0–4	Mury o dopuszczalnej wilgotności
II	3–5	4–6,5	Mury o podwyższonej wilgotności
III	5–8	6,5–10	Mury średnio wilgotne
IV	8–12	10–15	Mury mocno wilgotne
V	> 12	> 15	Mury mokre

Najprostszym rozwiązaniem jest oczywiście przeliczenie zakresów z uwzględnieniem gęstości kolejnych materiałów (propozycję taką autor zawarł dla trzech innych materiałów). Podane zakresy wynikają jedynie z prostych obliczeń matematycznych i dlatego należy traktować jedynie, jako propozycję ułatwiającą interpretację uzyskanych wyników.

Protokół z przeprowadzonych badań powinien zawierać: sposób poboru próbek, sprzęt wykorzystany do poboru, opis pobranej próbki (rodzaj materiału), liczbę próbek dla poszczególnych kondygnacji, wysokości, na jakich pobrano materiał, datę pobrania, miejsce badania, datę badania, aparaturę i sprzęt wykorzystany w laboratorium

Tab. 11 Wzór tabeli z wynikami wilgotności materiałów

Punkt pomiarowy	Miejsce pobrania	Wysokość [m]	Wilgotność [%]

Aparatura badawcza powinna zawierać:

- Suszarkę zdolną do utrzymywania temperatury suszenia minimum 105 °C z dokładnością ± 2 °C i wilgotności względnej na poziomie mniejszym niż 10%; w przypadku gorącego i wilgotnego powietrza lub niskiej temperatury suszenia konieczne może się okazać dostarczenie powietrza suszącego dla zapewnienia właściwej wilgotności względnej.
- Wagę pozwalającą na ważenie próbek do badań z niepewnością nie większą niż 0,1% ich masy.
- Ekspyktor.

4.4. Badania zasolenia elementów konstrukcji

Sole rozpuszczalne w wodzie należą do najgroźniejszych czynników niszczących obiekty budowlane. Dość często można się spotkać ze stwierdzeniem, że to właśnie one są przyczyną największych zniszczeń w obrębie przyziemia budynku. Ich wysokie

stężenia mogą prowadzić niekiedy do całkowitego zniszczenia zasolonych partii budynku. Nośnikiem soli w materiałach budowlanych jest woda, a zniszczenia powstają na skutek procesów krystalizacji soli podczas jej odparowywania. Dlatego też wysolenia w dużej mierze odpowiadają miejscom o podwyższonej wilgotności. Do najczęściej występujących w obiektach soli zaliczyć można: siarczany, chlorki, azotany oraz węglany sodu, potasu, wapnia, amonu oraz żelaza. Pod względem mineralogicznym do najbardziej rozpowszechnionych soli należą: Halit, Sylwin, Bischofit (Chlorki); Nitronatryt, Nitrokalcyt, Nitrokalit, Nitromagnezyt (Azotany); Mirabilit, Arkanit, Epsomit, Kizeryt, Tenardyt, Gips (Siarczany); Termonatryt, Natron (Węglany). W obiekcie niezmiernie rzadko występuje tylko jeden rodzaj soli. W rzeczywistości najczęściej mamy do czynienia ze strukturami o mieszanej budowie.

Z punktu widzenia chemicznego sole to substancje powstające w wyniku reakcji zobojętniania kwasu zasadą. Odczyn soli zależy od tego, jakie substancje brały udział w procesie jej tworzenia. W przypadku mocnego kwasu i zasady oraz słabego kwasu i zasady będzie on zbliżony do obojętnego. Sole mogą mieć również odczyny kwaśne przy mocnym kwasie i słabej zasadzie i zasadowe w układzie odwrotnym. Pamiętać należy, że związki te mogą wtedy reagować z materiałami budowlanymi tak jak odpowiadające im kwasy i zasady. Z punktu widzenia budownictwa największe znaczenie mają sole łatwo rozpuszczalne w wodzie, a więc takie, w których dość łatwo dochodzi do rozpadu na jony. Skład chemiczny soli jest czynnikiem odpowiadającym za stopień zagrożenia. Ma on bezpośredni wpływ zakres oraz intensywność procesów niszczących związanych z obecnością tych związków w materiale.

Nadmierne zasolenie jest problemem przede wszystkim starych obiektów, które nie posiadają izolacji, a co za tym idzie narażonych na stały kontakt z wilgocią. Problem ten może dotyczyć jednak również obiektów zabezpieczanych, w których zabezpieczenia przeciwilgociowe okazały się niedostateczne lub też użyte materiały posiadały wysokie zasolenie pierwotne. Pamiętać należy, że woda wnika, a następnie przemieszczająca się w materiałach jest pełna zanieczyszczeń. Takimi zanieczyszczeniami są również rozpuszczone w niej sole. Do źródeł o największym znaczeniu możemy zaliczyć sole:

- zawarte w materiałach budowlanych,
- podciągane w postaci rozpuszczonej z gruntu,
- trafiające wraz z opadami atmosferycznymi,
- wprowadzane podczas zabiegów konserwacyjnych i impregnacyjnych.

Surowce, z których wytwarzane są materiały budowlane zawierają określone ilości soli rozpuszczalnych. Dodatkowo w procesie wytwarzania materiałów oraz ich wbudowywania mogą powstawać kolejne związki. Dość duże stężenia soli budowlanych występują w spoiwach: cemencie, gipsie i wapnie, ale również w materiałach murowych. W przypadku obiektów zabytkowych, duże ilości soli trafiają do murów wraz z wilgocią podciąganą z gruntu. Dotyczy to przede wszystkim azotanów i chlorków. W związku z powyższym, że w obrębie starych murów często znajdowały się doły z nieczystościami, zabudowania z inwentarzem, w gruncie znajdują się duże ilości azotanów i azotynów.

Rozkład obumarłej roślinności powoduje dalsze podwyższenie tych związków w obrębie obiektów. Obecność chlorków może być również spowodowana stosowaniem soli w okresie zimowym. Sól trafia wtedy wraz z wodą do gruntu, lub też w postaci „błota pośniegowego” bezpośrednio na mury przyziemia. Głównym źródłem soli z grupy siarczanów są reakcje materiałów z zanieczyszczonym powietrzem, oraz efekt tzw. kwaśnych deszczów. Woda deszczowa wraz z rozpuszczonymi tlenkami kwasowymi obecnymi w zanieczyszczonej atmosferze wnika w głąb cegieł, kamieni i zapraw umożliwiając przemiany chemiczne prowadzące do degradacji murów.

Również źle dobrane metody i środki stosowane w pracach konserwatorskich i mogą być przyczyną wtórnego zasolenia obiektów. Przykładem takich prac jest oczyszczanie elewacji murów środkami zawierającymi kwasy lub zasady.

Mechanizm korozyjnego działania soli opiera się na procesach chemicznych i fizycznych, a substancją warunkującą procesy niszczenia jest woda. Sole jako substancje stałe nie przemieszczają się samoczynnie w materiałach. Dlatego też w procesach korozyjnych udział mają te, które bardzo dobrze i dobrze rozpuszczają się w wodzie. W postaci roztworu docierają wszędzie tam gdzie transportowana jest woda. Kumulacja ich następuje w miejscu, gdzie odparowuje woda. Zjawisko przemieszczania się soli nazywamy migracją do powierzchni. Do najgroźniejszych procesów związanych z solami zalicza się: krystalizację, higroskopijność, hydratację (uwodnienie), wzrost stężenia, zmianę odczynu roztworu.

Niszczące działanie soli opiera się przede wszystkim na zjawisku związanym z krystalizacją i powiększaniem się ich objętości. Powstające ciśnienie jest duże i wystarczające, by w materiale spowodować pęknięcie ścianek porów, rozluźnianie warstw powierzchniowych, a w następstwie prowadzić do jego rozpadu ziarnistego, łuszczenia się, pęknięcia i rozpadania. Dla znacznej grupy soli ciśnienie to ma wartość od kilkuset do znacznie powyżej 1000 atm. Siły towarzyszące procesowi krystalizacji są tak duże, że po kilku cyklach nawet najbardziej wytrzymałe cegły, kamienie i zaprawy ulegają niszczeniu. Wartość ich jest większa niż powstających wskutek zamarzania wody.

Destrukcyjne działanie soli może mieć efekt wieloraki. Przy ciągłym transporcie roztworu soli, jej krystalizacja następuje na powierzchni elementu. Możemy wtedy mówić o mniejszym bezpośrednim zagrożeniu destrukcją, ale znacznym pogorszeniu estetyki powierzchni materiału. Sole na powierzchni materiału krystalizować mogą w postaci plam, zacieków, wykwitów, puszystych nalotów i szklistych powłok. Forma ta zależy rodzaju i ilości soli, a również od warunków w jakich następuje krystalizacja.



Rys. 14 Korozja solna powierzchni muru przy zaprawie słabszej niż materiał murowy



Rys. 15 Korozja solna powierzchni muru przy zaprawie mocniejszej niż materiał murowy

W sytuacji gdy prędkość dostarczania roztworu jest mniejsza ma miejsce odparowanie wilgoci w głębi muru i krystalizacja wewnątrz przypowierzchniowych jego warstw. Taki przebieg zjawiska powoduje znacznie poważniejszą korozję murów. Do pewnego czasu brak jest widocznych efektów degradacji, następnie dochodzi do uszkodzeń znacznie poważniejszych niż w pierwszym przypadku. Uszkodzeniu ulegają wtedy całe fragmenty wypraw tynkarskich, czy też zewnętrznych powierzchni murów.



Rys. 16 Korozja solna na styku tynku i muru



Rys. 17 Korozja solna wewnątrz warstwy tynku



Rys. 18 Korozja solna na powierzchni tynku

Celem badania jest określenie procentowej zawartości głównych soli budowlanych (chlorków, siarczanów, azotanów i węglanów) w materiałach murowych, spoinach i tynkach obiektów pozostających w postaci trwałej ruiny. Uzyskana na podstawie wyników wiedza pozwala na: ocenę stanu murów, prognozowanie dalszych niekorzystnych zmian oraz świadome przyjmowanie rozwiązań mających na celu przeciwdziałanie zjawiskom destrukcyjnym.

Do najczęściej stosowanych metod analizy zasolenia murów należy chromatografia cieczowa, analizy laboratoryjne oraz gotowe testy chemiczne. Podstawowe zalety pierwszej z nich to: możliwość jednoczesnego oznaczania do kilkunastu jonów w próbce, krótki czas analizy, wykrywalność bardzo niskich stężeń, niewielka ilość próbki do analizy oraz prosty sposób przygotowania. Mankamentem natomiast jest dość wysoki koszt wykonania oznaczenia. Najczęściej przy badaniach zasolenia stosowane są gotowe testy chemiczne. Oznaczenia wykonywane są metodami miareczkowania lub też kolorymetrycznymi z użyciem tarcz lub skal barwnych. Podczas badań oznaczano obciążenie murów: siarczanami, chlorkami i azotanami rzadziej węglanami. Dodatkowo podczas badań oznaczona się pH badanego materiału.

Technika próbkowania w dużej mierze zależy od informacji, które mają zostać uzyskane na podstawie wyników badań. Oznaczanie może podlegać zasolenie samego muru lub też muru i tynku. Przy badaniu obciążenia solami muru z tynkiem wtórnym, który podczas remontu zostanie skuty, do badań pobrany powinien zostać sam materiał murowy. W sytuacji gdy historyczny tynk ma pozostać próbkowania powinny objąć obydwie warstwy. Ważnym jest aby próbkowanie nie miało charakteru powierzchniowego, gdyż zawartość soli w miejscach kumulacji jest często zawyżona. Dość trudnym jest określenie optymalnej głębokości i wysokości próbkowania oraz ilości próbek. Ze względu na nierównomierne obciążenie solami muru, różnorodność użytych cegieł często przesunięcie miejsca próbkowania o kilkanaście centymetrów daje odmienne wyniki.

Materiał do badań pobierany może być metodą odkucia lub też za pomocą odwiertów. Średnice wiertel oraz prędkość wiercenia w przeciwieństwie do badań wilgotnościowych nie mają tu znaczenia, materiał przed badaniem jest suszony do stałej masy. Istotnym jest aby pobrana zwierzina pochodziła z całej głębokości na jakiej założono oznaczenie zasolenia

W literaturze krajowej brak jest jednoznacznych wskazań jak interpretować uzyskane podczas badań wyniki. Nie rozwiązany jest również problem wyboru działań naprawczych w zależności od zbadanego zasolenia. Jedynie w normie PN-EN 206 znajdują się zapisy dotyczące maksymalnego stężenia części soli budowlanych (chlorków i siarczanów). Odnoszą się one jednak do konstrukcji betonowych i żelbetowych, tak więc w przypadku murów obiektów zabytkowych nie mają żadnego zastosowania. W pracach naukowych i opracowaniach eksperckich autorzy powołują się na wytyczne zagraniczne przede wszystkim niemieckie i austriackie. W opracowaniach tych podawane są różne poziomy czy też stopnie zasolenia, często różniące się między sobą procentowymi wartościami zasolenia w obrębie teoretycznie tego samego stopnia, czy też liczbą wprowadzonych poziomów. Niestety również w tych opracowaniach brak jest jednoznacznych wskazań jakie działania naprawcze należy wdrożyć. Poniżej w tabelach przedstawiono trzy propozycje interpretacji uzyskanych podczas badań wyników.

Zdecydowanie najpopularniejsza w Polsce jest tabela opracowana przez WTA, (Niemiecka Naukowo-Techniczna Grupa Robocza Ochrony zabytków i Renowacji Starego

Budownictwa, która zajmuje się ochroną i pielęgnacją zabytków oraz historycznej zabudowy), klasyfikująca zasolenie w postaci stopni. Wyróżnia ona trzy stopnie obciążenia solami budowlanymi (niski, średni i wysoki) dla trzech głównych grup soli.

Tab. 12 Stopnie obciążenia solami według aktualnej instrukcji WTA 2-9-04/D „Systemy tynków renowacyjnych”

Sole	Zawartość w% (masowo)		
	Stopień obciążenia	niskie	średnie
Chlorki	< 0,2	0,2–0,5	> 0,5
Azotany	< 0,1	0,1–0,3	> 0,3
Siarczany	< 0,5	0,5–1,5	> 1,5

Według austriackiej normy Ö-Norm B 3355 istnieją również trzy grupy zasolenia. Dodatkowo w zależności od stopnia dokument wskazuje brak lub konieczność podjęcia działań naprawczych. W przypadku grupy I nie jest potrzebne zastosowanie środków zapobiegawczych lub naprawczych. Przy II stopniu zasolenia tylko w niektórych przypadkach należy podjąć działania naprawcze. Natomiast, gdy zasolenie w badanym obiekcie jest na III poziomie, powinno się pilnie zastosować środki naprawcze.

Tab. 13 Klasyfikacja obciążenia solami na podstawie normy austriackiej Ö-Norm B 3355 „Osuszanie murów”

Aniony	Zasolenie w procentach masy		
	I	II	III
Chlorkowe	< 0,03	0,03–0,10	> 0,10
Azotanowe	< 0,05	0,05–0,15	> 0,15
Siarczanowe	< 0,10	0,10–0,25	> 0,25

Inną propozycją oceny stopnia zasolenia materiałów podaje autor publikacji „Osuszanie murów i renowacja piwnic” Frank Frössel 24. W opracowaniu autor wprowadza V stopni zasolenia wyrażonych w mmol soli/kg z dodatkowym opisem każdego z stopni. W tabeli stopnie zasolenia wyznaczają wartości zbiorcze dla wszystkich soli, co nie jest do końca właściwym ze względu na duże różnice w szkodliwości poszczególnych grup.

Tab. 14 Stopnie obciążenia solami na podstawie „Osuszanie murów i renowacja piwnic” Frank Frössel

Stopień I	0 do 2,5 mmol soli/kg	Konstrukcja ścian wykazuje śladowe ilości soli.
Stopień II	2,5 do 8 mmol soli/kg	Występuje niewielkie obciążenie solami konstrukcji.
Stopień III	8 do 25 mmol soli/kg	Występuje średni stopień obciążenia solami konstrukcji ścian.
Stopień IV	25 do 80 mmol soli/kg	Występuje wysoki stopień obciążenia solami.
Stopień V	ponad 80 mmol soli/kg	Jest to ekstremalne obciążenie solami.

Reasumując, bez względu na wybrany sposób interpretacji wyników po przeprowadzeniu badań można jedynie podać procentowe czy też wyrażone w mmol soli/kg wartości obciążenia solami materiału. Brakuje natomiast jednoznacznych odpowiedzi na pytanie w jaki sposób przy określonym zasoleniu przeciwdziałać temu zjawisku. Protokół z przeprowadzonych badań powinien zawierać: sposób poboru próbek, sprzęt wykorzystany do poboru, opis pobranej próbki (rodzaj materiału), wysokości i głębokości na jakich pobrano materiał, datę pobrania, miejsce badania, datę badania, aparaturę i sprzęt wykorzystany w laboratorium.

Tab. 15 Wzór przedstawienia wyników badań.

LP	Wysokość [m]	Głębokość [m]	Siarczany [%]	Azotany [%]	Chlorki [%]	pH	Miejsce pobrania próbki

Protokół powinien zawierać również szkice z naniesionymi punktami poboru oraz dokumentację fotograficzną.

5. Badania historycznych tynków i warstw malarskich

Malowidła i tynki w większości przypadków w obiektach w ruinie nie zachowały się, lub przetrwały w stanie szczątkowym. Dlatego ważne jest, aby te zachowane relikty podać badaniom specjalistycznym w celu ich dokumentacji. Badania zapraw i warstw malarskich prowadzone są przez konserwatorów-restauratorów dzieł sztuki, wspomaganych specjalistycznymi badaniami dla analiz fizyko-chemicznych i badań instrumentalnych. Metody badań dla tynków i zapraw są praktycznie jednakowe. Badania mają na celu rozpoznanie wystroju i historycznej substancji budowlanej pod kątem ich budowy i użytych materiałów oraz faktury, kolorystyki, analizy nawarstwień, stanu zachowania i zniszczeń z podaniem ich przyczyn. Celem większości badań jest przygotowanie wytycznych do projektów konserwatorskich.

Badania prowadzone są dwu etapowo:

- badania prowadzone in situ (m.in. odkrywki), w trakcie tychże badań typowane są miejsca poboru próbek do badań laboratoryjnych,
- badania laboratoryjne (budowy i składu materiałów):
 - analizy mikroskopowe (optyczna, elektronowa),
 - analizy instrumentalne (DTA, XRD, FTIR, XRF, EDS),
 - analizy opracowań kolorystycznych m. in. malarskich (stratygrafia, spoiwa, pigmenty).

5.1. Badania laboratoryjne zapraw

Badania laboratoryjne zapraw odgrywają istotną rolę w określaniu historii zabytków architektury. Charakterystyka historycznych zapraw bazuje na metodach badawczych, takich jak: mikroskopia polaryzacyjna (MP), dyfrakcja rentgenowska (XRD) termiczna analiza różnicowa (DTA/RGA), skaningowa mikroskopia elektronowa z analizatorem EDS (SEM- EDS). Wszystkie te metody wymagają pobierania z obiektu niewielkiej ilości substancji. Wybór właściwych metod jest m.in. związany z ilością dostępnego do badań materiału – są to metody niszczące, oraz oczekiwanymi rezultatami.

Pierwotnie metodą powszechnie stosowaną do badań zapraw była klasyczna ilościowa analiza chemiczna, która nie zawsze pozwalała na odtworzenie składu mineralnego zaprawy np. węglany – składnik bardzo istotny i charakterystyczny, rzutujący w pewnym sensie na rodzaj technologii zapraw, mogą występować w jako spoiwo i wypełniacz. Dlatego uważano, że koniecznym uzupełnieniem analizy chemicznej powinny być mikroskopowe badania zarówno zgładów i płytek cienkich. Zgodnie z propozycjami badaczy, obydwie te metody – chemiczna analiza ilościowa i analiza mikroskopowa – powinny być przyjęte jako warunek konieczny w badaniach zabytkowych zapraw. Stanowią one powinny programowe minimum, niezbędne do poznania składu i struktury materiału badawczego, stanowiąc punkt wyjściowy do szerszych badań, pozwalających

odtworzyć technologię. Obecny postęp w metodach badań zapraw nie wskazuje analizy chemicznej jako metody koniecznej ze względu na małą dokładność badań.

Znaczna część z wyżej wymienionych metod stanowi podstawę badań minerałów i skał, z których na szczególną uwagę zasługują metody mikroskopii w świetle przechodzącym spolaryzowanym (MP). Metody te dostarczają informacji nie tylko o składzie fazowym badanego materiału, lecz również istotnych danych o jego strukturze i relacjach przestrzennych wchodzących w skład zapraw składników.

Badania zapraw zwykle poprzedza wizualna ocena stanu zachowania i techniki wykonania. Na tej podstawie typowane są miejsca, z których pobierane są próbki do szczegółowych analiz instrumentalnych. Na tym etapie określany jest rodzaj próbek i wielkość fragmentów przeznaczonych do badań, w zależności od metodyki badań i zakresu analiz. Przyjęcie określonej metodyki badawczej pozwala później uniknąć sytuacji, której pobrana próbka okaże się za mała. Już na wstępie należy określić, które problemy powinny zostać rozwiązane co ułatwia wybranie właściwej metodyki badań.

Na ogół próbki zapraw są pobierane zgodnie z wskazaniami historyków sztuki i konserwatorów. Wpływ na wybór miejsca pobrania próbek wynika zwykle z dwóch zasad: pierwsza dotyczy wyboru tynków, gdzie ich oryginalny charakter ma potwierdzenie w dokumentacji archiwalnej. Druga zasada dotyczy poboru próbek z różnych technologicznie zapraw np. kamieniarskie, szlachetne, dekoracje sztukatorskie, elementy architektoniczne ze sztucznego kamienia.

Wszystkie te metody wymagają pobierania z obiektu niewielkiej ilości zabytkowej substancji. Sama czynność pobrania próbek ma charakter niszczący, gdyż powoduje bezpowrotną utratę fragmentów zabytkowych zapraw. Wybór właściwych metod badawczych jest m.in. związany z ilością dostępnego do badań materiału oraz oczekiwanymi rezultatami.

Ogólne zasady przyjęte w badaniu zapraw mówią, że materiał do badań powinien być autentyczny, dobrze zachowany i typowy dla danego obiektu. Przystępując do pobierania próbek należy kierować się następującymi zasadami:

- poza kryterium oceny wizualnej wybór miejsc pobrania próbek powinien być poparty, jeśli to możliwe wynikami badań nieniszczących;
- należy pobrać minimalną liczbę próbek, liczba próbek z jednego pomieszczenia nie mniej niż 3 próbki wielowarstwowe;
- próbki muszą mieć małe wymiary (jednak przy ich określaniu należy brać pod uwagę rodzaj i ilość analiz, które chcemy wykonać), dla zapraw wielkość próbek nie mniejsza niż 10 cm³;
- sposób pobrania – próbki wycina się w postaci kawałków (przy pomocy noża, dłuta), pobiera się wszystkie warstwy, aż do podłoża;
- miejsce pobrania – zgodnie z przyjętymi zasadami ogólnymi, (dodatkowym założeniem był wybór elementów łatwych do odtworzenia), miejsca poboru próbek powinny być uzupełnione zaprawą.

Istotny wpływ na interpretację wyników ma typ próbki poddanej analizie. Następnym ważnym parametrem jest wielkość próbki, która powinna zawierać badaną substancję w ilości wystarczającej na uzyskanie zadawalających wyników. Gdy wielkość próbki jest niewystarczająca i wkracza poza dolną granicę czułości użytej metody, rezultat badania jest negatywny, pomimo obecności poszukiwanej substancji. W odpowiednio dużej próbce rośnie prawdopodobieństwo rozpoznania składników drugorzędnych, a nawet śladowych oraz możliwości klasyfikacji szczegółowej.

5.1.1. Badanie makroskopowe

Badanie makroskopowe może dostarczyć niezbędnych informacji dla zrozumienia różnych aspektów oryginalnej techniki i stanu zachowania. „Wzrokowa” obserwacja może nie dawać precyzyjnych informacji, co do natury występujących materiałów, tym niemniej może być zasadniczą metodą, jeśli chodzi o wybór metod analiz laboratoryjnych i może być decydującą w interpretacji wyników. Badania wizualne nie są drogie i mogą być przeprowadzone *in situ* (bez konieczności poboru próbek). Wnioski są wyciągane natychmiast. Wizualna obserwacja jest umiejętnością zdobytą wyłącznie przez doświadczenie w badaniu dzieł sztuki.

Analiza makroskopowa stanowi wstępny etap badań laboratoryjnych zapraw. Umożliwia ona klasyfikację zapraw na podstawie cech dostrzegalnych okiem nieuzbrojonym oraz lupą o niewielkich powiększeniach.

Badania makroskopowe obejmą obserwację okiem nieuzbrojonym i lupą o powiększeniu około 6-10x i max 40x. W pierwszej fazie obserwacji poddawana jest całość próbek, a następnie fragmenty ze szczególnym zwróceniem uwagi na świeże przełamy. Określa się liczbę warstw, ich grubość, wzajemną przyczepność, barwę, zwięzłość, wielkość i rozmieszczenie porów, szczelin, rys. Oznacza się twardość w/g pięciostopniowej skali: bardzo twarda, twarda, dość twarda, niezbyt twarda, krucha.

Poniżej w tabeli przedstawiono przykładowe zestawienie wyników analiz makroskopowych. Jak wynika z zestawionych danych zaprawy makroskopowo różnią się głównie zabarwieniem w poszczególnych grupach, jakkolwiek ocena zabarwienia jest dość subiektywna i dla oznaczeń porównawczych powinna być zastosowana skala barw. Pozostałe wyróżnione cechy jak twardość, jakość powierzchni i przyczepność spoiwa do kruszywa w zaprawach, też zależą w dużym stopniu od subiektywnej oceny badacza. Z tego względu analizy makroskopowe należy traktować, jako badania wstępne, do bardziej szczegółowych analiz, nie ujmując ich przydatności przy wstępnej klasyfikacji zapraw. W obserwacjach makroskopowych wiele ważnych cech charakterystycznych danego tworzywa pozostaje, nierozpoznanych zwłaszcza, gdy składniki mają małe rozmiary.

5.1.2. Badanie mikroskopem optycznym

Badania mikroskopem optycznym połączone z badaniami instrumentalnymi (DTA i XRD) są pomocne w klasyfikacji chronologicznej zapraw występujących w obiekcie architektonicznym. Ułatwiają one określenie grup typologicznych zapraw charaktery-

stycznych dla różnych faz budowy zabytku oraz identyfikują nawarstwienia pochodzące z późniejszych ingerencji konserwatorskich.

Podstawowym celem badań mikroskopowych zapraw jest identyfikacja składników mineralnych wchodzących zarówno w skład wypełniacza, jak i składników stanowiących spoiwo. Identyfikację składników mineralnych prowadzi się w świetle przechodzącym, spolaryzowanym.



Fot. 55 Mikroskop polaryzacyjny – Zeiss Axiolab

Ilościowe metody analizy mikroskopowej pozwalają na oznaczenie poszczególnych składników mineralnych z dokładnością 1% w stosunku do analizy chemicznej. Dokładność taka jest w dostatecznym stopniu wystarczająca dla dobrej charakterystyki danej zaprawy. Materiały można analizować przy użyciu mikroskopu dla dwóch rodzajów preparatów mikroskopowych: preparatów proszkowych, płytek cienkich (szlifach mikroskopowych). Preparaty proszkowe, pozwalają na rozpoznanie składu jakościowego i ilościowego badanego materiału. Wskutek zniszczenia struktury i tekstury tworzywa w trakcie proszkowania nie dają one jednak możliwości określenia sposobu rozmieszczenia ziaren mineralnych w spoiwie i ich wzajemnych kontaktów.

Korzystniejsze jest bardziej pracochłonne przygotowanie preparatów w postaci płytek cienkich. Płytki cienkie przygotowuje się poprzez szlifowanie kawałka próbki na wirującej tarczy posypanej proszkiem ściernym. Po przyklejeniu przy pomocy balsamu kanadyjskiego do szkiełka podstawowego i zeszlifowaniu płytki do grubości 30–50 mikronów preparat utrwała się pokrywając płytkę cienką balsamem i szkiełkiem nakrywkowym. Płytki cienkie są preparatami pozwalającymi rozpoznać poszczególne składniki, lecz także prześledzić wielkość i stan zachowania ziaren (strukturę) oraz sposób rozmieszczenia poszczególnych składników i stopień wypełnienia nimi przestrzeni (teksturę). Określenie tych trzech czynników: struktury, tekstury i składu – pozwala na dokładną charakterystykę tworzywa, a tym samym umożliwia prowadzenie ścisłych studiów porównawczych.

Analiza mikroskopowa jakościowa

W celu uzyskania możliwie dokładnej charakterystyki badanego materiału mikroskopowego określa się, przede wszystkim cechy ogólne:

- teksturę zapraw – stopień rozmieszczenia ziaren w przestrzeni oraz stopień wypełnienia przestrzeni;
- strukturę zapraw – wielkość, kształt, stopień obtoczenia ziaren składników.

Przy ustalaniu tych cech posługuje się zasadami przyjętymi w petrografii. Określając skład jakościowy zapraw wyróżnia się dwa zasadnicze składniki:

- wypełniacz,
- spoiwo – substancja łącząca.

Dodatkowo w końcowym procesie analizy oznacza się: rozmieszczenie, kształt i wielkość porów. Wypełniaczem najpospolitszym jest w zaprawach piasek. Biorąc pod uwagę duże zróżnicowanie piasków w zależności od ich struktury, sedymentacji i składu mineralnego, dokładna jego charakterystyka może stanowić jedna z podstawowych cech w analizie porównawczej zapraw w obrębie jednego obiektu lub zespołu. Mając to na uwadze, przy analizie piasku wyodrębnia się grupy:

- składników głównych – przeważających ilościowo i decydujących dla klasyfikacji piasku;
- składników pobocznych – mniej licznych, o wyraźnym wpływie na klasyfikację;
- składników akcesorycznych – które występują sporadycznie, w niewielkiej ilości i nie mają znaczenia dla podstawowej klasyfikacji piasku.

W badaniach mikroskopowych zapraw zwraca się uwagę na wielkość ziaren, podając szacunkowo ich maksymalne, minimalne i najczęściej spotykane wymiary największych średnic. Dane można podać mierząc największe średnice 200 ziaren. Struktura określa wielkość poszczególnych składników, stopień rozwoju ziaren i ich kształt. Dla zapraw korzysta się z kryteriów struktur stosowanych dla skał osadowych. Biorąc pod uwagę wielkość ziaren wyróżnia się struktury:

- psefitową (ziarna o średnicy większej od 2 mm),
- psamitową (2 mm do 0,02 mm),
- pelitową (ziarna poniżej 0,02 mm).

Drugą cechą, na którą zwraca się uwagę, jest stopień obtoczenia (zaokrąglenia) ziaren, w tym przypadku można podać liczbę przybliżoną lub drogą dokładniejszej analizy liczbę po zmierzeniu (przynajmniej 200 ziaren). Wyróżniamy cztery stopnie obtoczenia:

- bardzo dobry stopień obtoczenia – reprezentują ziarna okrągłe, owalne nie wykazujące żadnych ostrych załamań na ich powierzchni,
- dobry – ziarna zaokrąglone, lecz wykazują załamania powierzchni, zaokrąglone mają tylko naroża,
- słabo obtoczone – wykazują liczne załamania powierzchni, zaokrąglone mają tylko naroża,
- ostrokrawędziste – ziarna mają ostre, niezaokrąglone krawędzie.

W trakcie badań zwraca się także uwagę na możliwość występowania innego, poza piaskiem wypełniacza, którego obecność mogłaby wywierać wpływ na technologię zapraw. Dotychczasowe badania, dowiodły, że w dawnych zaprawach (przede wszystkim wapiennych) znajdowano również wypełniacz węglanowy, wypaloną glinę, pokruszony materiał ceramiczny, substancje organiczne np.: słomę, cięte włókna lnu, konopi, sierść, fragmenty węgla drzewnego. Dodatki te stosowano w celu uzyskania zapraw o odpowiednich własnościach.

Z powyższych względów analiza wypełniacza powinna obejmować również oznaczenie rodzaju:

- dodatków organicznych,
- dodatków ceramicznych,
- innych dodatków (okruchy węglanów, wypalona glina, itp.).

W przypadku stwierdzenia obecności wypełniacza węglanowego wydziela się w nim, na podstawie cech mikroskopowych (kształtu, wielkości okruchów, stosunku do spoiwa i pozostałych składników zaprawy, właściwości optycznych):

- okruchy skał węglanowych, najczęściej obtoczone, o wyraźnych konturach, wielkością zbliżone do pozostałych składników piasku, stanowiące naturalną domieszkę piasku pełniące rolę wypełniacza;
- ostrokrawędziste, o wyraźnych konturach, różnej lub równej wielkości, okruchy pokruszonej skały węglanowej, dodanej do zaprawy w celu ulepszenia jej właściwości;
- okruchy o nieregularnych, często o owalnych zarysach, o zmiennej w obrębie fragmentu dwójłomności zatartych konturach utrudniających ich jednoznaczne wydzielenie spośród otaczającego spoiwa, zwykle wielkością przewyższające kilkakrotnie pozostałe składniki wypełniacza. Są to fragmenty niecałkowicie wypalonego kamienia wapiennego, który uległ rozdrobnieniu w czasie przygotowania zaprawy.

Spoiwo – masa łącząca ziarna wypełniacza. W przypadku zapraw wapiennych było pierwotnie wapnem gazonym. W miarę starzenia się zaprawy wodorotlenek wapnia przechodzi w węglan wapnia. Stopień rozwoju kryształów węglanu wapnia w zaprawach jest różny. Wydaje się być zasadą, że w zaprawach starszych mikrokryształy węglanu wapnia są większe od występujących w zaprawach młodszych. Inny może być stosunek spoiwa do ilości spojonych ziaren. W pewnych przypadkach występuje go niewiele (spoiwo porowe lub kontaktowe), w innych zaś ziarna otoczone są ze wszystkich stron spoiwem („pływają” w spoiwie) – spoiwo bazalne.

Analiza mikroskopowa spoiw obejmuje określenie:

- Składu jakościowego
 - Stopnia krystalizacji:
 - skrytokrystaliczne – w których nawet przy największych powiększeniach nie można było odróżnić poszczególnych ziaren,
 - mikrokrytaliczne – w których kryształy osiągają wielkość kilku tysięcznych mm.
- Typu (charakteru) spoiwa:
- kontaktowe (wiązące) – którego udział ilościowy w zaprawie jest niewielki; jest ono zaledwie widoczne między ziarnami wypełniacza,

- kontaktowo-porowe – występujące w niewielkiej ilości między ziarnami i wypełnia wolne przestrzenie (pory);
- bazalne (podstawowe) – o charakterze tła: ziarna wypełniacza otoczone ze wszystkich stron, nie stykają się ze sobą.
- Charakteru reakcji zachodzących między spoiwem a składnikami wypełniacza.

Analiza mikroskopowa ilościowa

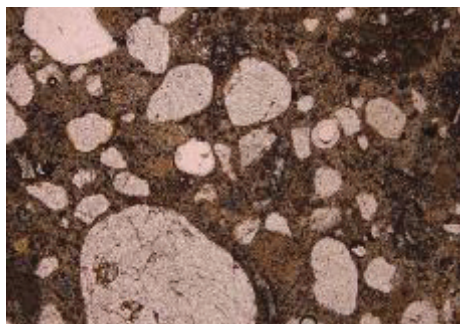
Dla pełnej charakterystyki zapraw, ustalenia zmiennych w różnych zaprawach ilości spoiwa i wypełniacza, wykonuje się mikrometryczną analizę płytek cienkich opartą na zasadzie Rossivala i Delesse'a; wg której stosunki liniowe ziaren odpowiadają, w przybliżeniu, ich stosunkom objętościowym. Po zmierzeniu około 300 ziaren, sumuje się wymiary ziaren różnych składników, a następnie przelicza się je na procenty objętościowe. Analizę ilościową zapraw można wykonać przy użyciu stolika integracyjnego „Eltinor”, urządzenie to umożliwia automatyczne sumowanie wymiarów ziaren 8 składników w automatycznie przesuwanym preparacie. Wyniki analizy ilościowej stanowią podstawę do obliczenia stosunku spoiwa do wypełniacza a tym samym do odtworzenia przybliżonego, wyjściowego składu zaprawy.

Protokół z badań

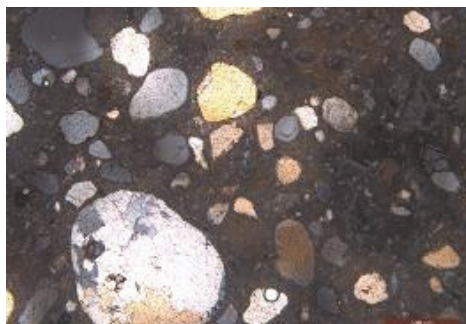
Oznaczenia mikroskopowe obejmują:

- analizę jakościową,
- analizę ilościową,
- rejestrację mikrofotograficzną.

Mierzy się składniki wchodzące w skład spoiwa np.: kalcyt, agregaty mikrokrystalicznego węgla wapnia, tlenki żelaza i składniki stanowiące kruszywo: okruchy wapienia pierwotnego, okruchy gipsu i piasek, dodatkowo pory. Wyniki podawane są w procentach objętościowych przyjmując za 100% sumę składników w próbce. Obserwacje mikroskopowe płytek cienkich grubości około 30 µm przeprowadza się za pomocą mikroskopu polaryzacyjnego, wyposażonego w aparat cyfrowy za pomocą którego wykonano zdjęcia. Na podstawie obserwacji ustala się skład fazowy spoiwa i wypełniacza, dokonuje się obserwacji cech teksturalnych próbek, szacuje się składniki.



Fot. 56 Obraz mikroskopowy próbki zaprawy wapiennej w świetle spolaryzowanym (1 polaryzator)



Fot. 57 Obraz mikroskopowy próbki zaprawy wapiennej w świetle spolaryzowanym (2 polaryzatory, skrzyżowane)

Obrazy mikroskopowe płytek cienkich zapraw wapiennych w świetle spolaryzowanym, przy jednym i dwóch skrzyżowanych polaryzatorach. Fotografie pokazują spoiwo mikro i krypto krystaliczne o charakterze bazalnym. Zaprawa ma strukturę psamitową, teksturę bezładną.

5.1.3. Badanie mikroskopem elektronowym (SEM) i analizy (SEM-EDS)

Skaningowy mikroskop elektronowy (SEM) jest wykorzystywany do badania mikrostruktury próbek pobranych obiektów zabytkowych. Użyteczność mikroskopu wynika z możliwości osiągnięcia maksymalnego powiększenia rzędu 300 000x. Elektronowa mikroskopia skaningowa pozwala na uzyskanie informacji o degradacji zapraw. Prowadzona analiza ułatwia obserwację mikropęknięć, zmian porowatości ułatwia identyfikację grzybów, pleśni, bakterii, itp. Daje możliwość określenia wielkości i formy minerałów obecnych w zaprawach, umożliwia poznanie i rejestrację tekstury warstw polichromii i nawarstwień.

Próbka do badań w mikroskopie elektronowym wymaga uprzedniej obróbki. Ograniczona jest wielkość preparatu, która nie powinna przekraczać wymiarów $\varnothing = 10$ mm i grubość $h = 3$ mm. Próbkę o takiej wielkości umieszcza się na specjalnym stoliku preparatowym, przyklejając ją odpowiednim klejem. Następnie do brzegów przyklejana jest taśma przewodząca, która umożliwia lepsze przewodzenie ładunku elektrycznego z badanej próbki do stolika preparatowego. W przypadku materiałów charakteryzujących się dużą opornością, gdzie utrudnione jest lub niemożliwe szybkie odprowadzenie ładunku z badanej powierzchni, aby polepszyć warunki przewodzenia napyla się (w wysokiej próżni) na powierzchnię preparatu cienką warstwę węgla lub złota.

Wiązka elektronów bombardujących może być kierowana na odpowiedni punkt, precyzyjnie odchylana wzdłuż określonej linii lub skanować wybrany fragment powierzchni próbki. Umożliwia to przeprowadzenie analiz punktowych, liniowych lub powierzchniowych.

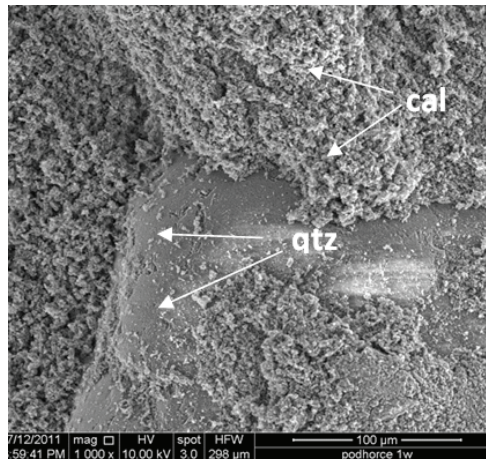
Analiza powierzchniowa „mapping” ułatwia umiejscowienie stref, w których znajdują się określone pierwiastki, analiza liniowa wskazuje ich lokalny rozkład. Analizy te dają informacje jakościowe i ilościowe o rozłożeniu poszczególnych pierwiastków, zaś analiza punktowa umożliwia ich ilościowe oznaczenie w wybranych mikroobszarach.

Technika SEM-EDS ułatwia wykonanie badań nieniszczących składu chemicznego poszczególnych warstw obecnych na przekrojach poprzecznych próbek zapraw. Do badań w mikroskopie elektronowym pobiera się fragmenty ze środka świeżego przełamania próbki.

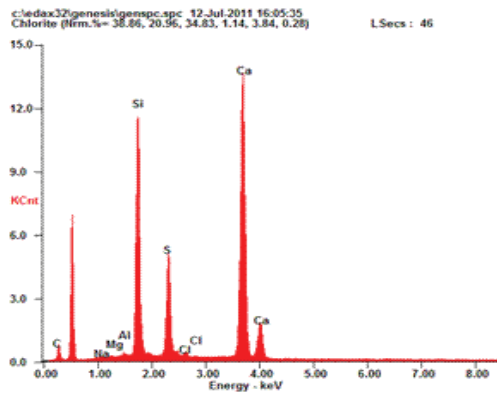
Opis wybranego fragmentu powinien zawierać następujące informacje:

- morfologię składników spoiwa, wielkość pojedynczych elementów lub skupisk oraz opis wzajemnych połączeń;
- jakość i rozprzestrzenienie porów powietrznych;
- charakterystykę opisową wzajemnych kontaktów między kruszywem, a spoiwem.

Opis preparatu powinien zawierać wyszczególnienie elementów struktury, występujących w danej próbce z uwzględnieniem ich morfologii i wielkości oraz charakteru wzajemnego kontaktu, elementów o jednakowych i zróżnicowanych morfologicznie. Należy zaznaczyć jakie elementy znajdują się w przewodzie w badanym preparacie. Mając na uwadze, że powierzchnia obserwowana w najlepszym przypadku wynosi około 2mm², dla każdej próbki należy wykonać minimum obserwacji na 3 – mikro próbkach pobranych z próbki właściwej. Dla ułatwienia możliwości porównania wyników badań (SEM) dla różnych próbek, dogodne jest wykonanie dokumentacji fotograficznej dla charakterystycznych obszarów, w ustalonych powiększeniach.



Fot. 58 Obraz przełamu próbki zaprawy wapiennej (SEM 800x) pokazuje porowatą zwartą masę spoiwa wapiennego (cal), w którym widoczne są niewielkie pojedyncze większe ziarno kwarcu (qtz)



Element	Wt%	Mol%
CO ₂	29.48	36.92
Na ₂ O	00.16	00.14
MgO	00.12	00.16
Al ₂ O ₃	00.28	00.15
SiO ₂	28.68	26.31
SO ₃	14.36	09.87
CaO	26.93	26.46

Rys. 17 Widmo energetyczne pokazuje zawartość poszczególnych pierwiastków w badanym obszarze, w tabeli przedstawiono wyniki analizy EDS próbek zapraw wapiennych

Analizy EDS próbek zapraw wapiennych wykazały obecność przede wszystkim tlenu krzemu pochodzącego z kwarcu, tlenków wapnia, siarki, pochodzących z kalcytu i gipsu. W mniejszej ilości są obecne tlenki magnezu, glinu, potasu,

5.1.4. Badanie derywatograficzne- termiczna analiza różnicowa (DTA)

Termiczna analiza różnicowa (DTA) jest metodą badawczą, w której wykrywamy efekty cieplne egzotermiczne i endotermiczne zachodzące w badanym układzie, towarzyszące przemianom fizycznym lub chemicznym oraz zmianę masy próbki. Metoda ta pozwala na wykrywanie substancji ulegających spaleni (np. dodatek węgla drzewnego) oraz substancji ulegających rozkładowi termicznemu (np. węgiel wapnia, węgiel magnezu, gipsu dwuwodnego).

Badanie wykonywane za pomocą DTA pozwala na identyfikację faz krystalicznych wchodzących w skład badanych próbek, ocenę jakości wapna użytego do zaprawy oraz przebieg procesów jej wiązania i twardnienia. Metoda jest przydatna do wstępnych badań w celu wyselekcjonowania próbek do badań szczegółowych np. badań mikroskopowych i XRD.

Próbkę zaprawy rozkrusza się w moździerzu agatowym. Badaną próbkę wraz z substancją wzorcową stanowiącą układ odniesienia ogrzewa się w piecu w jednakowych warunkach. Na podstawie pomiaru różnicy temperatur badanej próbki i układu odniesienia w trakcie liniowego ogrzewania można rejestrować przemiany cieplne.

Termiczna analiza różnicowa bazuje na pomiarze zmian własności fizycznych i chemicznych badanego materiału w zależności od temperatury. Mierzonymi wielkościami są energia, masa lub objętość.

Metoda DTA pozwala na przeprowadzenie pełnej interpretacji procesów związanych z przemianami fazowymi, rozkładem, reakcjami chemicznymi itp. Jednak umożliwia ona tylko przybliżone ocenienie składu ilościowego substancji obecnych w badanej próbce.

Wykonując termiczną analizę różnicową nie można określić z jakiego rodzaju spoiwa gipsowego wykonano zaprawę – czy ze spoiwa gipsowego wolno, czy szybko wiążącego- ponieważ produktem końcowym reakcji twardnienia tych spoiw jest zawsze gips (siarczan dwuwodny) ponadto analiza termiczna nie daje odpowiedzi, czy w zaprawie występuje anhydryt, ponieważ na DTA tego minerału nie obserwuje się efektów termicznych

5.1.5. Badanie dyfraktometryczne (XRD)

Dyfrakcja rentgenowska stosowana jest powszechnie jako metoda uzupełniająca w badaniach zapraw. Pozwala ona na precyzyjną identyfikację wielu związków o budowie krystalicznej (np. kwarcu, kalcytu, materiałów ilastych).

Technika umożliwia przeprowadzenie analiz zarówno jakościowych, jak i ilościowych. Natężenia linii dyfrakcyjnych dla danego składnika mieszaniny zależą od jego ilości w badanej próbce.



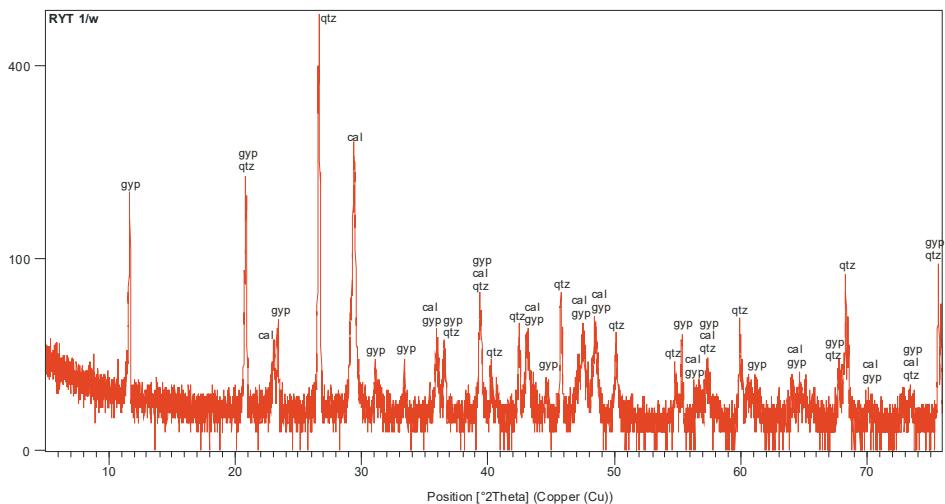
Fot. 59 Dyfraktometr rentgenowski – X'pert PRO MPD firmy Panalytical

Pomiary XRD materiałów zabytkowych wykonuje się na próbkach proszkowych, masy próbek przeznaczonych do analiz wynoszą kilka miligramów. Próbka ucierana jest w moździerz agatowym.

Dyfrakcja promieniowania rentgenowskiego (XRD) jest metodą wykorzystywaną do badań struktury substancji. W przypadku zjawiska dyfrakcji promieni X każde centrum staje się źródłem wtórnej fali kulistej o amplitudzie zależnej zwykle od kąta rozproszenia. Jeśli centra rozpraszające stanowią regularną strukturę przestrzenną, np. sieć krystaliczną to zachodzi interferencja fal rozproszonych na poszczególnych centrach (tzw. odbicie interferencyjne), powodując powstanie obrazów dyfrakcyjno - interferencyjnych.

W metodzie tej znając długość promieniowania rentgenowskiego, można na podstawie położenia maksimum dyfrakcyjnych wyznaczyć stałe sieci charakterystyczne dla określonych kryształów oraz rodzaju struktury. Wykorzystując dyfrakcję promieni rentgenowskich na sieciach przestrzennych kryształów, wiązki ugięte rejestruje się na błonie fotograficznej lub za pomocą liczników – detektorów promieniowania jonizującego. Otrzymane w ten sposób obrazy dyfrakcyjne noszą nazwę dyfraktogramów. Technika ta dostarcza dużo cennych informacji o strukturze krystalicznej i składzie fazowym materiałów stanowiących budulec zapraw. Technikę wykorzystuje się do identyfikacji kryształów obecnych w próbce i jej składu fazowego poprzez porównywanie uzyskanych dyfraktogramów wzorcami skatalogowanymi w specjalistycznych bibliotekach.

Jakkolwiek analiza dyfraktometryczna może mieć charakter jakościowy, to na podstawie intensywności refleksów od zidentyfikowanych faz określić można opisowo zawartość poszczególnych składników w próbce. Zwykle przyjmuje się następujące oznaczenia: +++ - składnik dominujący, ++ - składnik obecny, + - składnik śladowo obecny, ? - składnik przypuszczalny. Analiza dyfraktogramów pozwala na identyfikację składników.



Rys. 18 Dyfraktogram próbki zaprawy. Analiza rentgenograficzna próbki zaprawy pokazuje, że najintensywniejsze refleksy pochodzą od kwarcu - qtz (+++), który jest głównym składnikiem wypełniacza. Kolejne zidentyfikowane fazy mineralne dające silne refleksy to kalcyt - cal (++) i gips - gyp (++), które stanowią składniki spoiwa.

5.2. Badania laboratoryjne warstw malarskich

Identyfikacja materiałów, z której utworzono daną polichromię oraz rozpoznanie techniki wykonania wszystkich warstw chronologicznych często umożliwia rozróżnienie warstw autentycznych i wtórnych oraz określenie historii obiektu. Dużą rolę w datowaniu należy przypisać pigmentom, które były stosowane w określonych przedziałach czasowych. Rozpoznanie techniki wykonania dekoracyjnych opracowań malarskich może pomóc w określeniu chronologii całego obiektu. Badania techniki wykonania polichromii powinny być wsparte opracowaniami historyków sztuki (analiza formy, stylu, ikonografii, opracowanie źródeł historycznych).

5.2.1. Badanie mikroskopem optycznym

W badaniach warstw malarskich oraz identyfikacji pigmentów i spoiw najczęściej wykorzystywana jest mikroskopia optyczna. Badania mikroanalityczne pozwalają na wykonanie analiz na bardzo małej ilości substancji zabytkowej (rzędu kilku miligramów). Wyniki reakcji charakterystycznych obserwowane są pod mikroskopem optycznym pod małym powiększeniem (30–60x). Zaletą tych badań jest prostota wykonania.

Mikroskopowa analiza przekrojów warstw malarskich umożliwia określenie ilości, barwy, grubości i struktury poszczególnych warstw. Stratygrafie ukazują technikę malowania, ale również dostarczają wielu danych o stanie zachowania polichromii, a także o występowaniu warstw wtórnych. Analizy mikrochemiczne i reakcje charakterystyczne stosowane są głównie do identyfikacji pigmentów, rzadziej soli rozpuszczalnych w wodzie, czy produktów korozji.

Zatopienie próbek i wykonanie naszlifów. Jest to etap przygotowania materiału analizy materiału badawczego do dalszej analizy wizualnej oraz mikrochemicznej. Badaną próbkę zatapia się w żywicy syntetycznej, a po pewnym czasie jak żywica stwardnieje, poddajemy obróbce mechanicznej (szlifowanie) do momentu uzyskania wyraźnego przekroju poprzecznego przez wszystkie warstwy malarskie. Dla uzyskania lepszego efektu, w kolejnym etapie, próbkę polerujemy na specjalnej polerze na mokro, usuwając jednocześnie resztki zanieczyszczeń z jej powierzchni. Przygotowany w ten sposób materiał badawczy daje możliwość dalszej analizy mikroskopowej. Wykonanie barwnych fotografii przekrojów stratygraficznych warstw malarskich. Metoda ta jest wykorzystana do wstępnej identyfikacji pigmentów, spoiw i substancji organicznych pochodzących z ingerencji konserwatorskich.

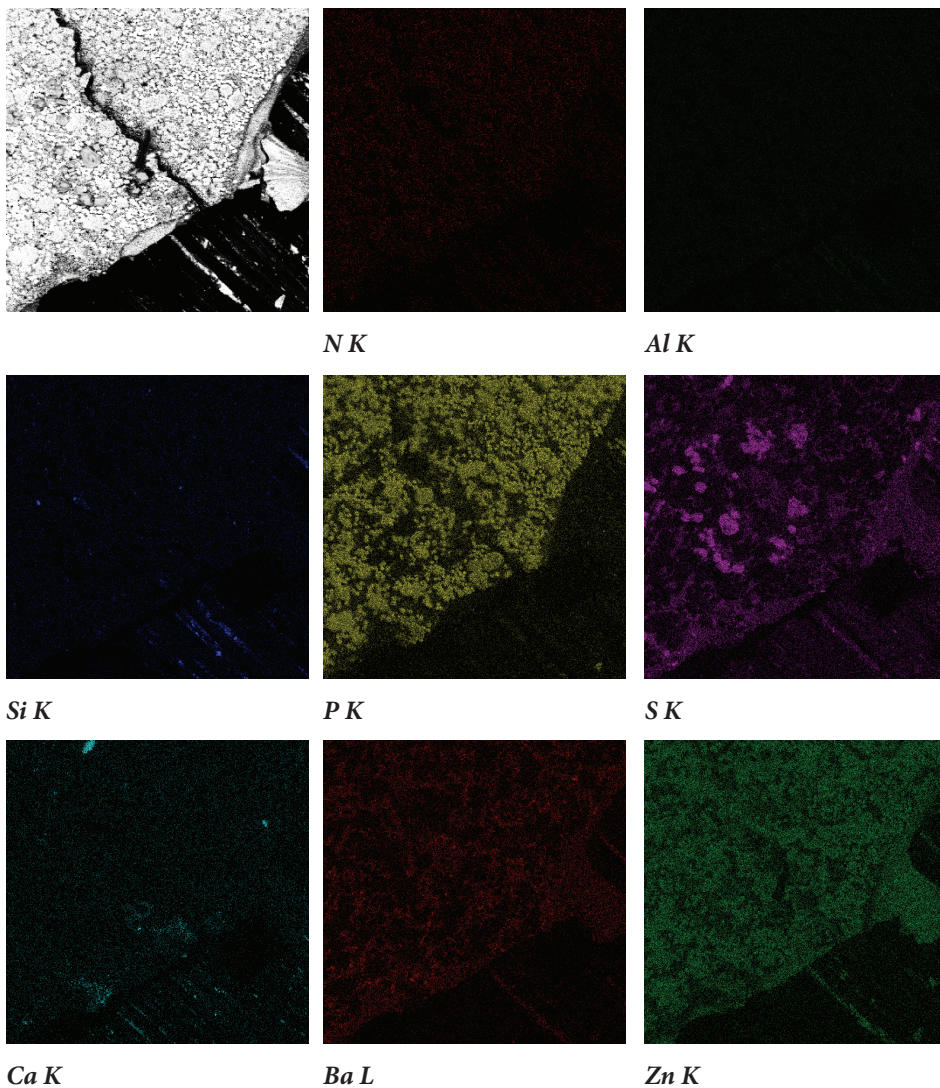
W trakcie przeprowadzania analiz mikrochemicznych próbka zadawana jest roztworem kwasu lub zasady. Reakcje identyfikacyjne bazują na tworzeniu się charakterystycznych kryształów, barw oraz na wydzielaniu się gazu. Zachodzą one w roztworach jonowych rozpuszczonych próbek. Reakcje mikrochemiczne przeprowadza się na szkiełkach mikroskopowych lub na paskach bibuły. Podstawowe badania mikroanalityczne próbek wykonuje się w następujących etapach:

- na wstępie, pod mikroskopem należy przeprowadzić dokładną obserwację rozdrobionej próbki, w celu zapoznania się ze strukturą i wyglądem badanych materiałów. Na tym etapie można dokonać rozdzielenia fragmentów przeznaczonych do mikroanaliz;
- próbkę należy zadać roztworem kwasu lub zasady i po obserwacji pod mikroskopem ogrzać ją w celu rozpuszczenia oraz wysuszyć;
- suchą pozostałość należy rozpuścić w kwasie octowym lub w wodzie i zadać odpowiednim odczynnikiem;
- pod mikroskopem, w polu jasnym i ciemnym oraz w świetle przechodzącym należy obserwować efekty reakcji.

Zaletami badań mikrochemicznych i reakcji charakterystycznych są: mały koszt i względnie dobra czułość. Głównym zarzutem stawianym tym badaniom jest znaczne zużycie materiału, spowodowane koniecznością wykonania serii analiz na obecność poszczególnych grup substancji lub pojedynczych związków. Jednak analizy tego typu są przydatne do potwierdzenia lub zaprzeczenia pojedynczych substancji przewidywanych w próbce.

5.2.2. Badanie mikroskopem elektronowym (SEM)

Technika (SEM-EDS) umożliwia wykonanie badań nieniszczących składu chemicznego poszczególnych warstw na przekrojach poprzecznych i powierzchniach próbek polichromii. Metodyka badań analogiczna jak dla zapraw, została opisana w punkcie dotyczącym badań mikroskopem elektronowym zapraw. Badania z zastosowaniem skaningowego mikroskopu elektronowego sprzężonego z energodispersyjną mikrosondą elektronową EDS (SEM-ESD). Mikroanaliza EDS umożliwia stworzenie map pierwiastkowych, obrazujących rozłożenie pierwiastków w badanym obszarze próbki.



Fot. 60 Mapa rozkładu pierwiastków (SEM-EDS). Wyniki badań powierzchni wymalowania. Pierwsze zdjęcie ukazuje obraz elektronów rozproszonych z obszaru analizowanej powierzchni próbki (SEM-BEI). Pozostałe zdjęcia to obrazy rozkładu gęstości określonych pierwiastków na powierzchni próbki (SEM-EDS)

5.2.3. *Badanie związków organicznych: pigmentów, barwinków, spoiw – analiza Fouriera (FTIR)*

Główne korzyści wynikające z użycia spektroskopii FTIR leżą w możliwościach chemicznej analizy w przestrzeni obrazu (mikro-FTIR, mapowanie lub obrazowanie), jednocześnie i na tej samej próbce, zarówno materiałów organicznych jak i materiałów nieorganicznych, bez względu na to czy mają strukturę krystaliczną czy amorficzną. Jest właściwą metodą analityczną do identyfikacją małych, mikrogramowych próbek zło-

żonych mieszanin (organicznych oraz nieorganicznych). Pozwala rozróżnić chemiczne podobne substancje (tj. oleje schnące, woski organiczne, minerały, pigmenty itp.). Pozwala wykryć w próbce obecność zarówno związków krystalicznych jak i amorficznych. Pozwala uprościć interpretacje widm dzięki bibliotekom standartowych widm odniesienia, innym bibliotekom. Mikroskopia FTIR jest odpowiednią metodą analityczną do scharakteryzowania nieorganicznych warstw i organicznych materiałów oraz może być użyta w laboratorium do badań degradacji powierzchni jako metoda nieinwazyjna.

Spektroskopia w podczerwieni wykorzystywana jest w analizach składu warstw malarzkiej techniki stosowana jest do chemicznej identyfikacji zarówno związków organicznych (spoiw, barwników, werniksów, kleje warstwy zewnętrzne, itp.) jak i nieorganicznych (pigmenty, produkty korozji, sole, itp.)



Fot. 61 Spektrometr w podczerwieni – FTIR Nicolet

Zarówno analizy za pomocą spektrometru FTIR wymagają mikropróbek pobranych z obiektu. Dlatego ta technika powinna być traktowana jako mikroinwazyjna. Próbki stałe, którymi są warstwy polichromii malowideł ściennych, przygotowywane są metodą pastylkowania. Odważka sproszkowanej próbki mieszana jest z proszkiem KBr i poddawana jest prasowaniu pod ciśnieniem 6–12 atmosfer. Ponieważ bromek potasu jest przezroczysty w przedziale $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ mierzone pasma absorpcyjne pochodzą od badanej substancji.

Główne korzyści wynikające z użycia spektroskopii FTIR leżą w możliwościach chemicznej analizy w przestrzeni obrazu (mikro-FTIR, mapowanie lub obrazowanie), jednocześnie i na tej samej próbce, zarówno materiałów organicznych (media wiążące, werniks, kleje, pokrycia, konsolidanty itp.) jak i materiałów nieorganicznych (pigmenty, produkty korozji, sole itp.) bez względu na to czy mają strukturę krystaliczną czy amorficzną. Wynikiem analizy w podczerwieni jest widmo, które jest wykresem procentowej transmisji/ absorpcji próbki w funkcji długości (cm^{-1}). W przypadku skomplikowanych układów widma mogą być czasami trudne do interpretacji, jak to zdarza się w przypadku pokrywania się widm transmisji/absorpcji składników. Z tego powodu pomocne może być przeprowadzone wstępnej selekcji analizowanych cząstek. Uzyskane widma z analizowanej próbki poddaje się pewnej operacji matematycznej – trans-

formacji fourierowskiej. Następnie tak opracowane krzywe pomiarowe poddawane są interpretacji – identyfikacji znajdujących się w analizowanej próbce związków organicznych: pigmentów, barwników, spoiw.

5.2.4. Badanie spektrometryczne – Fluorescencja rentgenowska (XRF)

Fluorescencja rentgenowska (XRF) jest jedną z najczęściej stosowanych technik analitycznych do analizy składu pierwiastkowego zabytkowych materiałów. Wymóg jak najmniejszej ingerencji w materię zabytkową przyczynił się do skonstruowania wielu typów małych przenośnych spektrometrów, za pomocą których można wykonać analizy XRF in situ.

Technika XRF jest powszechnie stosowana do badań warstw malarskich (pigmentów), metali i ich stopów materiałów ceramicznych i szklanych, produktów korozji. Spektrometry XRF najczęściej pozwalają na identyfikację pierwiastków o liczbach atomowych zawartych między 11 a 92 (od Sodiu Na do Uranu U). Przy czym identyfikacja pierwiastków lżejszych, o liczbach atomowych od 11 (Sodu) do 21 (Skandiu) powinna być wykonywana w próżni lub w atmosferze helu).



Fot. 62 Spektrometr Epsilon 3 firmy Panalytical

W technice XRF wykorzystuje się promieniowanie rentgenowskie w obszarze pomiędzy 5 i 10 Å, którym naświetla się badany materiał. Promieniowanie rentgenowskie wybija elektrony z wewnętrznych powłok elektronowych atomów próbki. Powtórnemu zapełnieniu tych powłok towarzyszy emisja fluorescencyjnego promieniowania rentgenowskiego (to zjawisko jest wykorzystywane do analizy składu pierwiastkowego). Linie emisyjne fluorescencji oznaczone są symbolami K, L, M... W zależności od tego które z wewnętrznych powłok atomowych atomu są zapełnione w wyniku przejść fluorescencyjnych. Energia fotonów wybranej linii emisyjnej fluorescencji zależy od liczby atomowej wzbudzonego atomu, dlatego pozwala na jego identyfikację.

Zarejestrowane widmo promieniowania jest charakterystyczne dla danego atomu. Linie widmowe na spektrogramie oznaczają obecność poszczególnych pierwiastków znajdujących się w analizowanej próbce – analiza ta określana jest mianem jakościowej, a z natężenia tych linii możemy przeprowadzić analizę ilościową.

6. Bibliografia

- Alaimo R., L. Di Franco R., Giarrusso V., Briuccia G., Montana G., *Plasters from the historical buildings of Palermo (Sicily): raw materials, causes and mechanisms of decay*, [in:] Moropoulou A., F. Zezza, E. Kollias, I Papachristodoulou (Eds.), *Proceedings of the IV International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin*, Rhodes 6–11 May 1997, Technical Chamber of Greece, vol. 1, 1997, s. 53–64
- Atzeni, C., Massidda L., and Sunna U., *Magnesian limes: experimental contribution to interpreting historical data*, [in:] *Science and Technology for Cultural Heritage*, 1996, vol. 5, s. 29–36.
- Balliana L., Falchia E., Piovesan M., Sgobbi M., Zendri E., *Stucco Forte in Venice between the 16th and 17th centuries: the case study of Addolorata Chapel stuccoes in San Pantalon's Church* *Procedia Chemistry*, vol. 8, 2013, s. 92–99.
- Bar E., Faldrowicz J., *Dokumentowanie zabytków architektury metodami fotogrametrycznymi i skaningu laserowego*, *Acta Scientifica Academiae Ostroviensis*, nr 34, 2010, s. 5–14,
- Bartz W., Filar T., *Mineralogical characterization of rendering mortars from decorative details of a baroque building in Koźuchów (SW Poland)*, *Materials Characterization*, vol. 1, 2010, s.105–115.
- Bartz W., J. Rogóż, R. Rogal, A. Cupa, P. Szroeder, *Characterization of historical lime plasters by combined non-destructive and destructive tests: The case of the sgraffito in Bożnów (SW Poland)*, „*Construction and Building Materials*”, vol. 30, 2012, s. 439–446.
- Basiul E., Bartz W., Cupa A., *Badania diagnostyczne w konserwacji i restauracji zabytków*, [w:] *Problemy konserwacji i badań zabytków architektury*, prac. zbiorowa pod red. A. Kociałkowskiej, Studzinaka 2007, s.195–222.
- Brochwicz Z., *Badania składu mineralnego sztucznego kamienia w XIV-wiecznych rzeźbach i elementach architektonicznych na zamku w Malborku*, PP Pracownie konserwacji Zabytków, Ośrodek Informacji Konserwatorskiej, Warszawa 1984, s. 5–79.
- Brochwicz Z., *Badania wczesnośredniowiecznych zapraw budowlanych – integralną częścią badań archeologicznych*, „*Materiały Zachodniopomorskie*”, t. 22, 1975, s. 95–245.
- Brochwicz Z., *Charakterystyka siedemnastowiecznych narzutów wapiennych występujących w elementach dekoracyjnych na elewacji kamienicy „Pod Gwiazdą” w Toruniu*, [w:] *AUNC Zabytkoznawstwo i Konserwatorstwo*, t. 5, 1974, s. 69–90.
- Brochwicz Z., *Identyfikacja skrobi i związków białkowych na przekrojach warstw malarских i zapraw*, „*Materiały Zachodniopomorskie*”, t. 4, 1960, s. 539–545.
- Brochwicz Z., *Materiały wiążące w budownictwie starożytnym i wczesnośredniowiecznym*, „*Materiały Zachodniopomorskie*”, t. 19, 1974, s. 753–791.
- Brochwicz Z., *Monochromia z wypełniaczem ceramicznym na sklepieniu kaplicy zamkowej w Golubiu*, [w:] *AUNC Zabytkoznawstwo i Konserwatorstwo*, z. 53, 1973, s. 91–104.

- Brochwicz Z., *Zaprawa wapienna jako tworzywo elementów architektonicznych na przykładzie służek w kaplicy zamkowej w Radzynie* [w:] *AUNC Zabytkoznawstwo i Konserwatorstwo*, z. 44, 1973, s.127–139.
- Bruni S., Cariatì F., Fermo P., Pozzi A., Toniolo L., *Characterization of ancient magnesian mortars coming from northern Italy*, „*Termochimica Acta*”, vol. 321, 1998, s.161–165.
- Brusaporci S., *The Representation of Architectural Heritage in the Digital Age*, *Encyclopedia of Information Science and Technology*, Information Resources Management, USA, 2005.
- Brykowska M., *Metody pomiarów i badań zabytków architektury*, Warszawa 2003
- Cardell-Fernández, C. Navarrete-Aguilera, *Pigment and plasterwork analyses of Nasrid polychromed place work stucco in the Alhambra (Granada, Spain)*, „*Studies in Conservation*”, vol. 51, 2006, s. 161–176.
- Cavallo G., Derighetti L., Napoli S., *The emigration of prealpine lake masters: a study of a 17th-century mantelpiece attributed to the Carlone family of Rovio (Ticino, Switzerland)*, „*Archaeometry*”, vol. 47, 2005, s. 425–439.
- Centofanti M., Brusaporci S., *Interpretative 3D digital models in architectural surveying of historical buildings*, *Computational modelling of objects represented in images*, London 2012.
- Ciach. T., Osler S., *Badania nad wczesnośredniowiecznymi zaprawami występującymi w posadzkach zabytkowych reliktyw w Wiślicy*, „*Ochrona Zabytków*”, nr 3, 1970, s. 197–209.
- Donnelly J., *Ruins: the Conservation and Repair of Masonry Ruins*, *Government Publications Sales Office*, Dublin 2010.
- Eklund J. A., Young M. E., *Biological Growth on Masonry: Identification & Understanding. Inform. Information of historic building owners*. Published by Historic Scotland, January 2013.
- Elsen J., *Microscopy of historic mortars – a review*, „*Cement and Concrete Research*”, vol. 6, issue 8, 2006, s. 1416–1424.
- Fawcett R., *Treatment of vegetation at monuments* [w:] *The Conservation of Architectural Ancient Monuments in Scotland. Guidance on Principles*. Published by Historic Scotland. Longmore House. Salisbury Place. Edinburgh 2001, s. 44–47.
- Ferraby S., *The ecology of ruin sites* [w:] *Conservation of Ruins*, zzzElsevier Science & Technology, 2006, s. 209–210.
- Frössel F., *Osuszanie murów i renowacja piwnic*, Warszawa 2007.
- Galván-Ruiz M., Velázquez-Castillo R., Pérez-Lara M. A., Arjona J., Baños J. L., Rodríguez-García M. E., *Chemical and physical characterization of stuccos from a Mexican colonial building: el Museo del Calendario of Queretaro*, „*Archaeometry*”, vol. 51, 2009, s. 701–714.
- Gołębniak A., *Rola nowych technik dokumentacyjno-pomiarowych w interdyscyplinarnych działaniach badawczo-konserwatorskich*, „*Wiadomości Konserwatorskie*” 40/2014, s. 83–93.

- Gołka J., Haliński J., *Fotogrametria cyfrowa w architekturze – nowe możliwości inwentaryzacji i archiwizacji obiektów*, „Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji”, Vol. 10, 2000, s. 38-1:38-7.
- Gruszczyński, M., Matysek P., *Ocena wytrzymałości murów ceglanych na podstawie badań odwiertów rdzeniowych*, „Czasopismo Techniczne”. Budownictwo, 2011, R. 108, z. 3-B, s. 57–69.
- Jabłoczyńska-Jędrzejewska H., *Dawne zaprawy budowlane*, „Kwartalnik Architektury i urbanistyki”, t. 3, z. 1, 1958, s. 85–94.
- Jachimski J., *Fotogrametryczna inwentaryzacja obiektów zabytkowych*, „Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji”, vol. 7, 1997, s. 53–60.
- Jasieńko J., Mierzejewska O., Hamrol K., Misztal W., *Utrwalanie koron murów obiektów historycznych przeznaczonych do ekspozycji w formie trwałej ruiny*, „Wiadomości konserwatorskie” nr 30, 2011, s. 117–132.
- Karaszkiwicz P., *Sole w obiektach budowlanych*, „Materiały budowlane” nr 8/2002
- Klimkowska H., Wróbel A., *Uwagi o wykorzystaniu tachimetrów bezlustrzonych w inwentaryzacji architektonicznej*, „Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji”, vol. 16, 2016, s. 297–303.
- Kozarski P., Molski P., *Zagospodarowanie i konserwacja zabytkowych budowli*. Towarzystwo Przyjaciół Fortyfikacji, Fortyfikacje, t. 14, Warszawa 2001.
- Krzywobłocka R., *Mikroskopowe metody badania materiałów budowlanych*, ITB Warszawa 1966, mps.
- Kwoczyńska B., *Opracowanie obiektów architektonicznych z wykorzystaniem metod stosowanych w fotogrametrii cyfrowej*, „Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich”, nr 3/2010, s. 65–74.
- Lanas J., et al., *Mechanical properties of masonry repair dolomitic lime-based plasters*, „Cement and Concrete Research”, vol. 36, 5: 2006, s. 951–960.
- Mazzocchin G. A., Vianello A., Minghelli S., Rudello D., *Analysis of Roman wall paintings from the thermae of ‘Iulia Concordia’*, „Archaeometry”, vol. 52, 2010, s. 644–655.
- Oberc A., *Zastosowanie mikroskopowych metod petrograficznych w pracach nad konserwacją zabytków*, BMiOZ s. B, t. 11, 1965, s. 69–78.
- Ochrona budynków przed korozją biologiczną*, pod redakcją J. Ważnego, J. Karysia, Warszawa 2001.
- Ö-Norm B 3355 „Osuszanie murów”.
- Prarat M., *Wykorzystanie tachimetrii i fotogrametrii w dokumentacji zabytków architektury na przykładzie inwentaryzacji pomiarowo-rysunkowej wybranych kamienic toruńskich*, „Acta Universitatis Nicolai Copernici”, No. 46, 2015, s. 509–531.
- Parat M., Schaaf Urlich, *Inwentaryzacja pomiarowo-rysunkowa zabytków architektury drewnianej w procesie konserwatorskim – problemy i propozycja standaryzacji*, „Budownictwo i Architektura” vol. 14(4) (2015), s. 99–110.
- PN-70/B-02365 – *Powierzchnie budynków – Podział, określenia i zasady obmiaru*.

- PN-ISO9836:1997 – *Właściwości użytkowe w budownictwie – Określenie i obliczanie wskaźników powierzchniowych i kubaturowych.*
- Poksińska M., *Materiały i technika dolnośląskich sztukaterii z drugiej połowy XVII wieku.* Praca doktorska przygotowana pod kierunkiem prof. dr hab. Zbigniewa Brochwicza na Wydziale Sztuk Pięknych, Uniwersytet im. Mikołaja Kopernika [mps], Toruń 1982, sygn. 578.
- Poksińska M., *Problemy identyfikacji związków organicznych w zabytkowych sztukateriach,* [w:] Informator PKZ 1981, Chemia w konserwacji zabytków. Materiały z II Ogólnopolskiego Zjazdu Chemików Konserwatorów, Toruń–Bachotek wrzesień, 1981, s. 24–28.
- Poksińska M., *The technology of ancient mortars as a basis for contemporary reconstruction of historical plaster and stuccoes,* [w:] *Conservation et restoration des biens cultures.* Preservation and Restoration of Cultural Heritage. Montreux 1995, s. 649–656.
- Poksińska M., Wyrwa A. M., Kęsy-Lewandowska M., *Technologia dawnych zapraw jako przyczynek do poznania chronologii faz budowy rotundy i kościoła cysterskiego w Łeknie,* [w:] *Studia i materiały do dziejów Pałuk. Środowisko naturalne i osadnictwo w łekieńskim kompleksie osadniczym.* Pod red. A. M. Wyrwy, t. 3, 2000, s. 368–390.
- Quinlan M., Hanna M., Kelly D., *The conservation and repair of masonry ruins,* –Government of Ireland, Dublin 2010.
- Rampazzi L., Rizzo B., Colombo C., Conti C., Realini M., Bartolucci U., Colombini M. P., Spiriti A., Facchin L., *The stucco technique of the Magistri Comacini: the case study of Santa Maria dei Ghirli in Campione D'italia (Como, Italy)** Archaeometry (2012).
- Rampazzia L., Rizzo B., Colombob C., Contib C., Realinib M., Bartoluccic U., Colombinic Maria P.A., Spiritid A., Facchind L., *The stucco decorations from St. Lorenzo in Laino (Como, Italy): The materials and the techniques employed by the “Magistri Comacini”.* „Analytica Chimica Acta”, vol. 630, Issue 1, 2008, s. 91–100.
- Rogóż J., *Zastosowanie technik nieniszczących w badaniach konserwatorskich malowideł ściennych,* Wydawnictwo Naukowe UMK, Toruń 2009.
- Sansonetti A., Striova J., Biondelli D., Castellucci E. M., *Colored grounds of gilt stucco surfaces as analyzed by a combined microscopic, spectroscopic and elemental analytical approach,* „Analytical and Bioanalytical Chemistry”, vol. 397, 2010, s. 2667–2676.
- Sieniawska-Kuras A., Potocki P., *Przyczyny zniszczeń obiektów budowlanych i elementów architektonicznych. Procesy biologiczne.* [w:] *Renowacja elementów architektury.* Wydawnictwo i handel książkami „KaBe”, Krosno 2012, s. 53–55.
- Skibiński S., *Badania nad zaprawami budowlanymi,* [w:] *Materiały sprawozdawcze z badań zespołu pobenedyktyńskiego w Mogilnie,* BMiOZ, Seria B, z. 3, Warszawa 1983, s. 31.
- Skibiński S., *Badania składu fazowego i struktury kamiennych obiektów zabytkowych w ekspertyzie konserwatorskiej,* [w:] *Chemia w konserwacji zabytków. Materiały konferencyjne,* 1982, s. 160–170.

- Skibiński S., Kęsy-Lewandowska M., *Zastosowanie termicznej analizy różnicowej do badań zapraw budowlanych dla potrzeb archeologii i architektury* [w:] *ACTA, Archeologia XIII – Archeologia Architektury, Nauki Humanistyczno-Społeczne*, z. 184, 1990, s. 104–150.
- Skibiński S., *Wyniki badań nad zaprawami pochodzącymi z pierwszej przebudowy kościoła oraz najwcześniejszych obwarowań klasztorńskich*, [w:] *Materiały sprawozdawcze z badań zespołu pobenedyktynskiego w Mogilnie*, BMiOZ, Seria B, t. 60, z. 2, 1980, s. 76–83.
- Skibiński S., *Wyniki badań próbek zapraw budowlanych*, [w:] *Materiały sprawozdawcze z badań zespołu pobenedyktynskiego w Mogilnie*, BMiOZ, Seria B, z. 3, Warszawa 1983, s. 37–44.
- Skibiński S., *Sole rozpuszczalne w wodzie*, „Renowacje” nr 10/2000.
- Strzelczyk A. B., *Czynniki niszczące kamienie. Czynniki biologiczne*, [w:] *Zabytki kamienne i metalowe ich niszczenie i konserwacja profilaktyczna*, red. Wiesław Domasłowski. Wydawnictwo Naukowe UMK, Toruń 2011, s. 135–157.
- Szmygin B., *Wprowadzenie*, [w:] *Trwała ruina II. Problemy utrzymania i adaptacji. Ochrona, konserwacja i adaptacja zabytkowych murów*, pod red. Szmygin B. Lublin–Warszawa 2010, s. 5–6.
- Tajchman J., *Standardy w zakresie projektowania, realizacji i nadzorów prac konserwatorskich dotyczących zabytków architektury i budownictwa*, Toruń–Warszawa 2014.
- Tajchman J., *Metoda zabezpieczania i rewitalizacji ruin historycznych jako szczególny rodzaj konserwacji i restauracji zabytków architektury*, *Materiały z międzynarodowej konferencji naukowej*, Gubin 2008.
- Trizio I., *GIS-technologies and Cultural Heritage: stocktaking, documentation and management*. [in:] *Rethinking Cultural Heritage, Experiences from Europe and Asia*, Dresden 2007, s. 75–91
- Trochonowicz M., *Obiekty murowe w ruinie. Wpływ czynników degradujących na ich zachowanie*, [w:] *Trwała ruina II. Problemy utrzymania i adaptacji. Ochrona, konserwacja i adaptacja zabytkowych murów*, pod red. Szmygin B., Lublin–Warszawa, LTN, Politechnika Lubelska, PKN ICOMOS, 2010.
- Trochonowicz M., *Zamek w Janowcu nad Wisłą. Ocena stanu wilgotnościowego i zasolenia murów*. Politechnika Lubelska, Lublin 2006.
- Uścińowicz J., *Standardy dokumentacji konserwatorskiej obiektów architektury drewnianej jako podstawa monitoringu i zarządzania*, [w:] *Dokumentacja i monitoring w zarządzaniu obiektami budownictwa drewnianego w Muzeum Rolnictwa im. ks. Krzysztofa Klukaw Ciecchanowcu oraz Muzeum Ryfylke*, pod. red. A. Grabowska. Ciecchanowiec 2015, s. 43–67.
- Wirską-Parachowiak M., *Z historii wiążących materiałów budowlanych*, „Ochrona Zabytków”, nr 4, 1956, s.17–23.
- Wouters J., Van Bos M., Lamens K., *Baroque stucco marble decorations. II. Composition and degradation of the organic materials in historical samples and implications for their conservation*, „Studies in Conservation”, vol. 45, 2000, s. 169–179.

Wójcik J., Skibiński S., *Próba rozpoznania surowców skalnych zastosowanych w sklepieniach krypt romańskich w Mogilnie* [w:] *Materiały sprawozdawcze z badań zespołu pobenedyktynskiego w Mogilnie*. BMiOZ Seria B z. 2, 1980, s. 52–71.

WTA 2-9-04/D „Systemy tynków renowacyjnych.”

Wytyczne Techniczne G-3.4, Inwentaryzacja zespołów urbanistycznych, zespołów zieleni i obiektów architektury, GUGiK, Warszawa, 1981.

Strony internetowe:

<http://geo-metric.com/fotogrametria-cyfrowa>, [dostęp: 24.07.2018 r.].

<http://www.wrogeo.pl/pl/fotogrametria.html>, [dostęp: 24.07.2018 r.].