

Wstępne nieniszczące badania posadzki i ścian w Pałacu Wielkich Mistrzów na zamku średnim w Malborku

Preliminary non-destructive tests of the floor and walls in the Palace of the Grand Masters of the middle castle in Malbork

prof. dr hab. inż. Łukasz Drobiec (ORCID: 0000-0001-9825-6343), Katedra Konstrukcji Budowlanych, Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska, mgr inż. Sylwia Kozłowska (ORCID: 0009-0005-1077-790X), Muzeum Zamkowe w Malborku

DOI: 10.5604/01.3001.0054.3607

Streszczenie: Zamek w Malborku jest najpotężniejszą twierdzą średniowiecznej Europy. Jego niezwykle walory historyczno-artystyczne doceniono w 1997 roku, wpisując obiekt na listę Światowego Dziedzictwa Kulturowego UNESCO. Niestety tak stary obiekt wciąż jest narażony na powstawanie uszkodzeń. Przed trzydziestoma laty konieczne było kompleksowe wzmocnienie posadowienia północno-zachodniej ściany Wielkiego Refektarza na Zamku Średnim. Obecnie zarysowania ścian i sklepień występują w południowo-wschodniej części Pałacu Wielkich Mistrzów. Wystąpienie uszkodzeń w tak unikatowym obiekcie należy traktować bardzo poważnie. W artykule opisano wyniki wstępnych nieniszczących badań posadzek piwnicznych i ścian wykonanych w rejonie uszkodzeń. Na podstawie analizy uzyskanych wyników wskazano dalsze kierunki koniecznych prac diagnostycznych.

Słowa kluczowe: zamek średniowieczny, uszkodzenia murów, zarysowania, badania nieniszczące, tomografia ultradźwiękowa, metoda radarowa, wykrywanie wad wewnętrznych.

Abstract: Malbork Castle is the largest castle in medieval Europe. Its extraordinary historical and artistic values were appreciated in 1997, when the castle was entered on the UNESCO World Heritage List. Unfortunately, such an old building is still vulnerable to damage. Thirty years ago, it was necessary to comprehensively strengthen the foundation of the north-western wall of the Great Refectory in the Middle Castle. Currently, the walls and vaults are scratched in the south-eastern part of the Palace of the Grand Masters. The occurrence of damage in such a unique object should be treated very seriously. The article describes the results of preliminary non-destructive tests of basements floor and wall coatings made in the area of damage. On the basis of the analysis of the obtained results, further directions of necessary diagnostic work were indicated.

Keywords: medieval castle, damage to walls, scratches, non-destructive testing, ultrasonic tomography, radar method, detection of internal defects.

1. Wprowadzenie

Zamek w Malborku jest obiektem unikatowym w skali światowej. Jest to największa twierdza średniowiecznej Europy – szacuje się, że składa się ona z około 15 milionów cegieł. Jego niezwykle walory doceniono w 1997 roku, wpisując zamek na listę Światowego Dziedzictwa Kulturowego UNESCO. Rozpoczęcie budowy zamku w Malborku datuje się na ok. 1280 rok, co oznacza, że najstarsze mury liczą sobie ponad 740 lat. Budowę zakończono po niespełna dwustu latach, w połowie XV wieku. Wydawać by się mogło, że po tylu latach eksploatacji grunt w poziomie posadowienia murów jest skonsolidowany i nic nie zagraża stateczności ścian. Tymczasem 30 lat temu zaistniała konieczność pilnej interwencji w poziomie posadowienia zachodniej ściany Wielkiego Refektarza [1, 2, 3, 4]. Ścianę tą posadowiono za pośrednictwem drewnianych pali. Zastosowano tam dłuższe, około trzymetrowe, skrajne pale (poza obwodem spodu

fundamentu) oraz nieco krótsze (2,5 m pale pod samym fundamentem). Przyczyną osiadań i obrotu ściany było obniżenie poziomu wody w pobliskim Nogacie, co spowodowało obniżenie poziomu wód gruntowych i w konsekwencji wysuszenie i butwienie drewnianych pali. Wzmocnienie posadowienia wykonano w technologii mikropali.

W ostatnich latach zaobserwowano powstawanie zarysowań w południowo-wschodniej części Pałacu Wielkich Mistrzów, zlokalizowanego na Zamku Średnim. Rysy występują zarówno na murach, jak i na kolebkowych oraz palmowych sklepieniach obiektu. Powstanie zarysowań w tak unikatowym obiekcie należy traktować bardzo poważnie [5, 6]. Przed naprawą należy określić przyczynę uszkodzeń, a sama naprawa powinna tę przyczynę eliminować lub przynajmniej niwelować [7, 8]. W artykule opisano wstępne badania nieniszczące przeprowadzone w Pałacu Wielkich Mistrzów na Zamku Średnim w Malborku. Podjęto próbę badań posadzek w piwnicach oraz ścian w rejonie zarysowań. Badania prowadzono

metodą tomografii ultradźwiękowej oraz metodą radarową. Na podstawie analizy uzyskanych wyników ustalono dalsze kierunki koniecznych prac diagnostycznych.

2. Pałac Wielkich Mistrzów

Początkowo obiekt znajdujący się w obrębie dzisiejszego Pałacu Wielkich Mistrzów był pod względem architektonicznym bardzo skromny. Został on wzniesiony przez wielkiego mistrza Zakonu Krzyżackiego Karola z Trewiru (w latach 1311–1324). Pierwszy pałac znajdował się w starszym skrzydle gospodarczym pierwszego przedzamcza, które zostało w tym celu przekształcone od wewnątrz. Prace budowlane zakończono w 1324 r. [9, 10, 11, 12]. Następnie wzniesiono nowe reprezentacyjne budowle – od wschodu kaplicę p.w. św. Katarzyny, a od północy Wielki Refektarz. Refektarz służył jako główna sala ważnych zebrań oraz jako miejsce wydawanych dwa razy dziennie posiłków dla świty wielkiego mistrza. Po około 50 latach pierwszy pałac nie odpowiadał już wymaganiom mieszkalnym, reprezentacyjnym i administracyjnym wielkiego mistrza. Dlatego też za czasów wielkiego mistrza Konrada Zöllner von Rotenstein (1382–1390), krótko po 1382 r. doszło do znacznej rozbudowy obiektu. Prace budowlane zostały zakończone już za rządów wielkiego mistrza Konrada von Jungingen (1393–1407). Zgodnie z wynikami najnowszych badań [9, 11] do 1393 r. zbudowano najprawdopodobniej część zachodnią dzisiejszego Pałacu Wielkich Mistrzów. Wzniesiono wówczas reprezentacyjną budowlę, w której na najwyższym piętrze zlokalizowano dwa nowe refektarze: zimowy i letni. W latach 1393–1398 pałac rozbudowano dalej w kierunku wschodnim. Wzniesiony



Rys. 1. Pałac Wielkich Mistrzów od strony północno-zachodniej

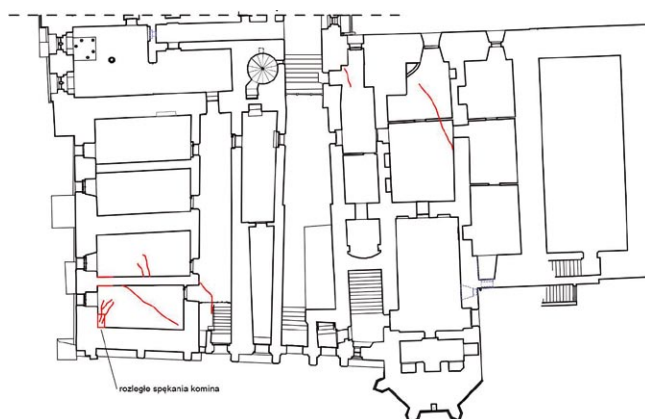


Rys. 2. Elewacja południowo-zachodnia Pałacu Wielkich Mistrzów

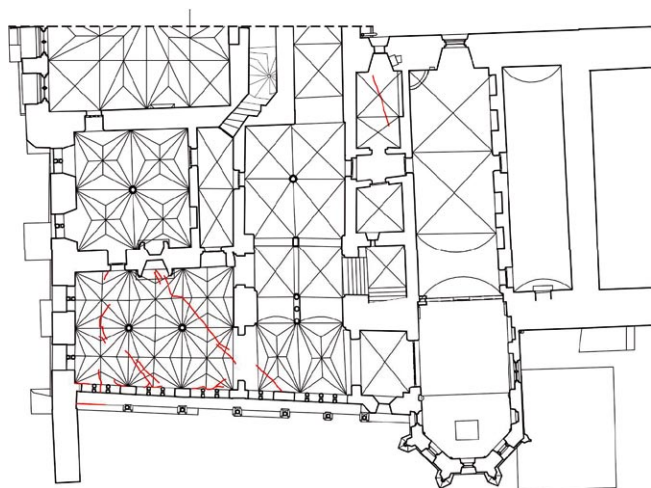
do końca XIV wieku wspaniały gmach pałacu zachował się w dużej mierze niezmienny do dziś. Widok Pałacu Wielkich Mistrzów pokazano na rysunkach 1 i 2.

3. Uszkodzenia

Zgodnie z informacjami uzyskanymi od Zarządcy obiektu pierwsze rysy w Pałacu Wielkich Mistrzów zaobserwowano w 1995 r. Analiza fotografii archiwalnych wykazała, że rysy na południowo-wschodniej elewacji występowały już w latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych XX wieku. Następnie, wraz z remontem elewacji rysy wypełniono zaprawą i w latach dziewięćdziesiątych rozwarły się one ponownie. Nie wiadomo dokładnie, kiedy powstały rysy na sklepieniach. Obecnie zarysowania występują na dwóch południowo-wschodnich skrajnych ścianach piwnicy, na sklepieniach kolebkowych dwóch skrajnych pomieszczeń i korytarza piwnicy, na południowo-wschodniej ścianie parteru i na sklepieniach palmowych Niskiej Sieni oraz Sali Narożnej. Zarówno w piwnicy, jak i na parterze mniejsze rysy występują również po przeciwległej północnej stronie (w pomieszczeniach Archiwum Państwowego oraz w sypialni wielkich mistrzów). Szkicową inwentaryzację uszkodzeń zaprezentowano na rysunkach 3 i 4.



Rys. 3. Szkicowa inwentaryzacja uszkodzeń w pomieszczeniach przyziemia Pałacu Wielkich Mistrzów

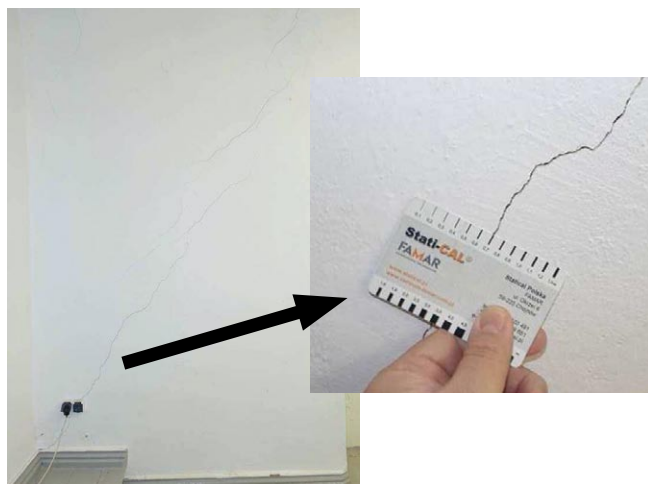


Rys. 4. Szkicowa inwentaryzacja uszkodzeń w poziomie I piętra Pałacu Wielkich Mistrzów

Rozwarcie większości rys wynosi obecnie do 4 mm, jednak lokalnie w partiach przyziemia występują spękania komina o rozwarciu do 30 mm. Widok wybranych zarysowań w Pałacu Wielkich Mistrzów pokazano na rysunkach 5–10.



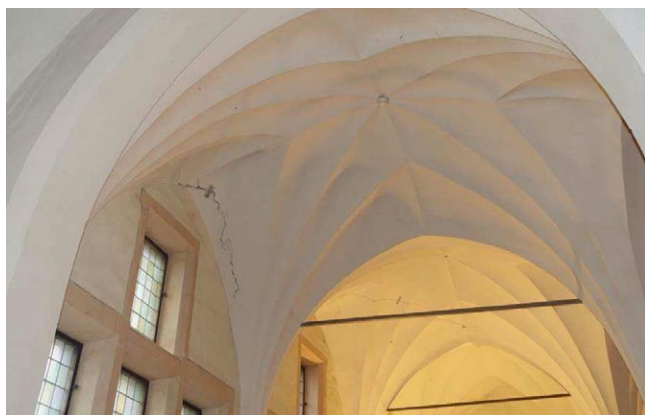
Rys. 5. Spękania komina w piwnicy – rozwarcie 30 mm



Rys. 6. Zarysowanie ściany nośnej w piwnicy – rozwarcie 0,7 mm



Rys. 7. Zarysowanie sklepienia w niskiej sieni – rozwarcie 1,0 mm

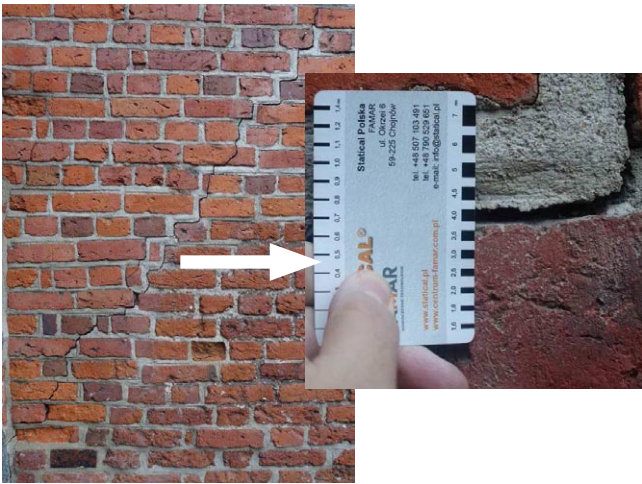


Rys. 8. Zarysowanie sklepienia w komnacie narożnej – rozwarcie do 2 mm

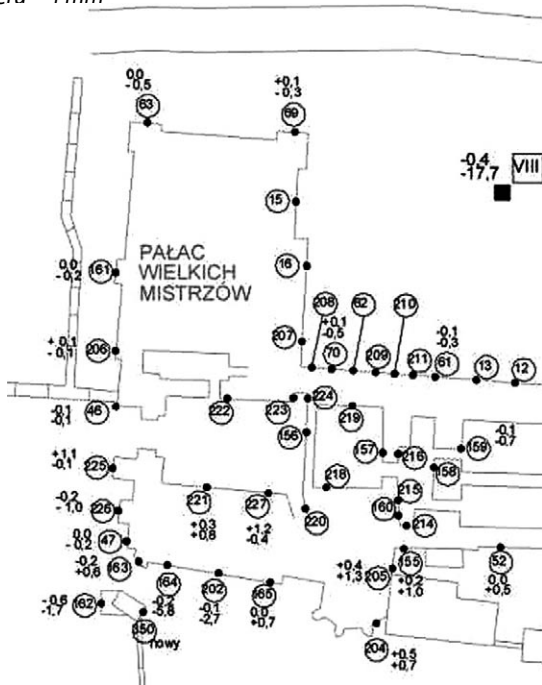
Rys. 9. Zarysowanie sklepienia w komnacie narożnej – rozwarcie do 2 mm



Na terenie zamku w Malborku od 2009 r. prowadzony jest monitoring geodezyjny (pomiar przemieszczeń pionowych i poziomych na reperach) oraz pomiar rozwarcia rys. Wskaźniki rozwarcia rys założono w piwnicy w 2009 r., a na sklepieniach parteru w 2021 r. Pomiar przemieszczeń pionowych wykazał największe zmiany na reperach usytuowanych na ścianie południowo-wschodniej (repery nr 164 i 202 – rysunek 11). Osiedzenia repera nr 164 wynoszą 0,2 mm przez ostatnie pół roku i 5,8 mm od 2009 r. Reper nr 202 osiadł przez pół roku o 0,1 mm i o 2,7 mm od 2009 r. Pomiar przemieszczeń poziomych nie wykazuje istotnych zmian, co świadczy o tym,



Rys. 10. Pomiar rozwarcia rysy w południowo-wschodniej ścianie parteru – 4 mm



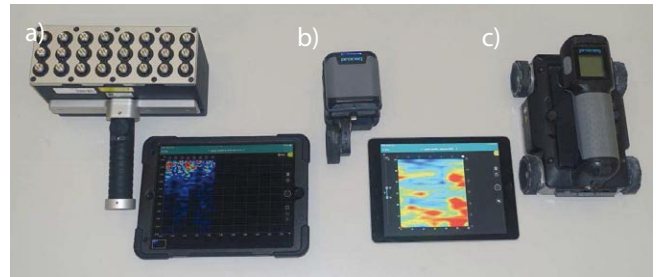
Rys. 11. Wyniki pomiaru przemieszczeń pionowych

że osiadania są pionowe i nie dochodzi do obrotu ścian, jak to miało miejsce w Wielkim Refektarzu. Największe zmiany rozwarcia rys zaobserwowano na kominie w piwnicy. Znajdujące się na nim stanowiska pomiarowe nr S29 i S30 w cyklu pomiarowym 2021-2022 wykazały przemieszczenie kolejno 0,8 mm i 0,4 mm, w cyklu poprzednim (2019–2021) odpowiednio: 3,4 mm oraz 1,1 mm, a sumarycznie od 2009 roku: 18,1 mm oraz 16,1 mm. Rozwarcie rys na sklepieniach palmowych parteru od 2021 r. zwiększyło się o 0,25 mm.

4. Badania nieniszczące

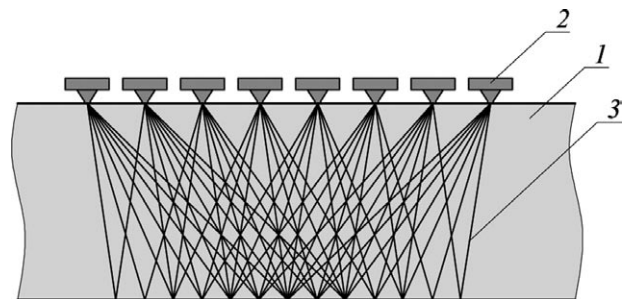
Wykonano nieniszczące badania ścian i posadzki w pomieszczeniach przyziemia użytkowanych przez Archiwum Państwowe w Malborku. Celem badań była lokalizacja ewentualnych

puštěk wewnętrznych. Badania przeprowadzono przy użyciu tomografu ultradźwiękowego PD8000 firmy Proceq oraz urządzeń radarowych GP8000 i GP8800 firmy Proceq. Urządzenia pokazano na rysunku 12.



Rys. 12. Urządzenia zastosowane w badaniach: a) tomograf ultradźwiękowy PD8000, b) radar GP8800, c) radar GP8000

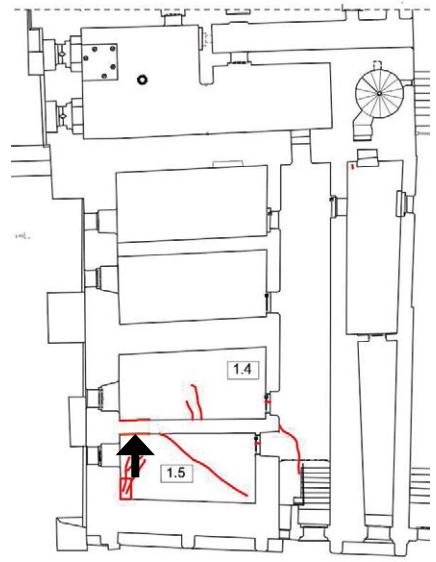
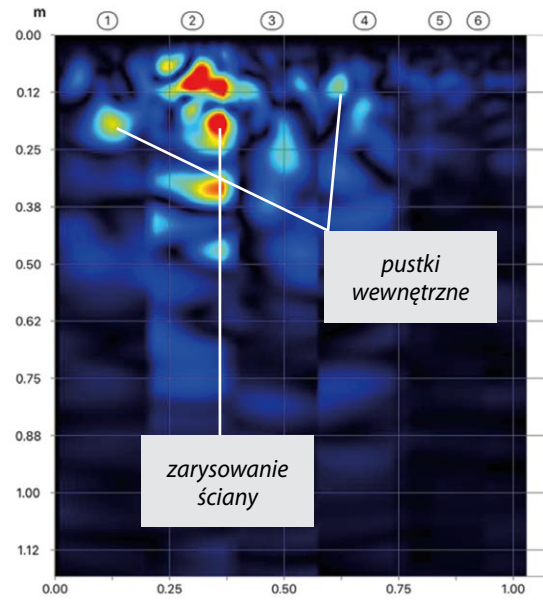
Tomograf ultradźwiękowy został wyposażony w trzy rzędy po osiem głowic eksponencyjnych, pracujących w zakresie częstotliwości 50 kHz. Każdy przetwornik pomiarowy emitował ultradźwiękową falę poprzeczną. Zasada działania tomografu jest taka, że jedna głowica nadaje sygnał ultradźwiękowy, a pozostałe odbierają tzw. A-skan (sygnał ultradźwiękowy opisany zależnością amplitudy od czasu). Następnie kolejna głowica nadaje, a pozostałe odbierają i tak dalej. Głowice wysyłają po kolei własne sygnały z opóźnieniem 8–200 ms. Pełny pomiar w jednym rzędzie obejmuje 28 A-skanów (rys. 13). A-skany służą do tworzenia w czasie rzeczywistym tzw. B-skanu, czyli przekroju badanego elementu usytuowanego prostopadle do powierzchni skanowania. W celu wizualizacji wyników badań amplitudom odebranego sygnału oprogramowanie przyporządkowuje kolory i tworzy mapy. Amplitudom o najmniejszych wartościach przyporządkowany jest kolor granatowy (duża gęstość), a amplitudom o wartościach największych kolor czerwony (puštěki powietrzne). Zasięg urządzenia wynosi do 2,5 m w głąb badanego elementu.



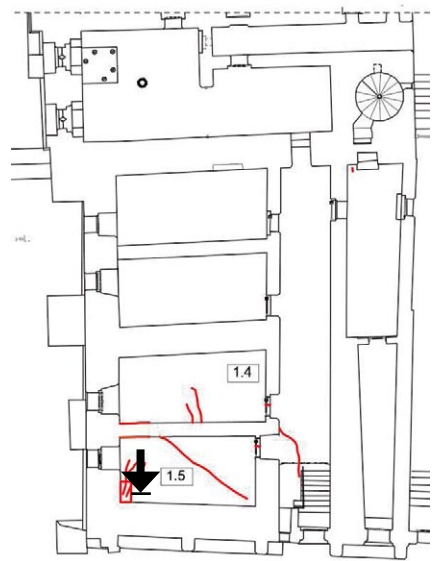
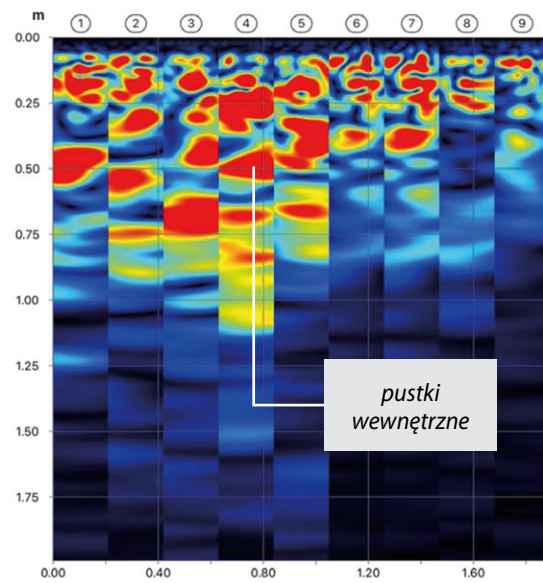
Rys. 13. Zasada działania tomografu ultradźwiękowego: 1 – badany element, 2 – głowice eksponencyjne, 3 – wiązka ultradźwiękowa

Do pomiarów radarowych wykorzystano dwa urządzenia georadarowe GP8800 i GP8000, w których zabudowano po jednej antenie nadawczo-odbiorczej. Pierwsze urządzenie generuje sygnał pomiarowy o skokowo zmiennej częstotliwości w zakresie 0,4–6,0 GHz, natomiast GP 8800 generuje sygnał

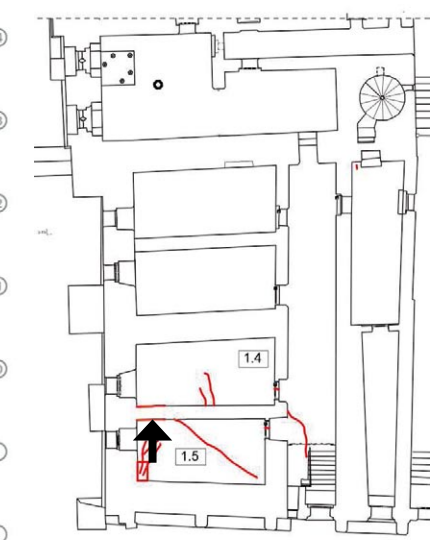
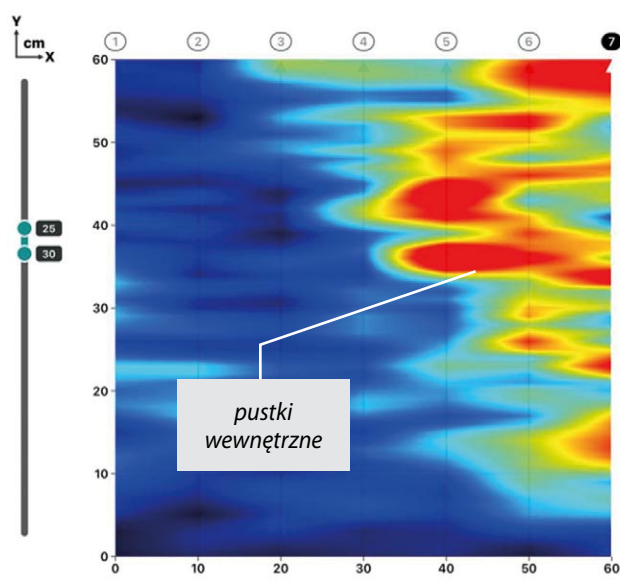
Rys. 14. Badania ściany tomografem ultradźwiękowym PD8000; wykryto drobne pustki wewnętrzne



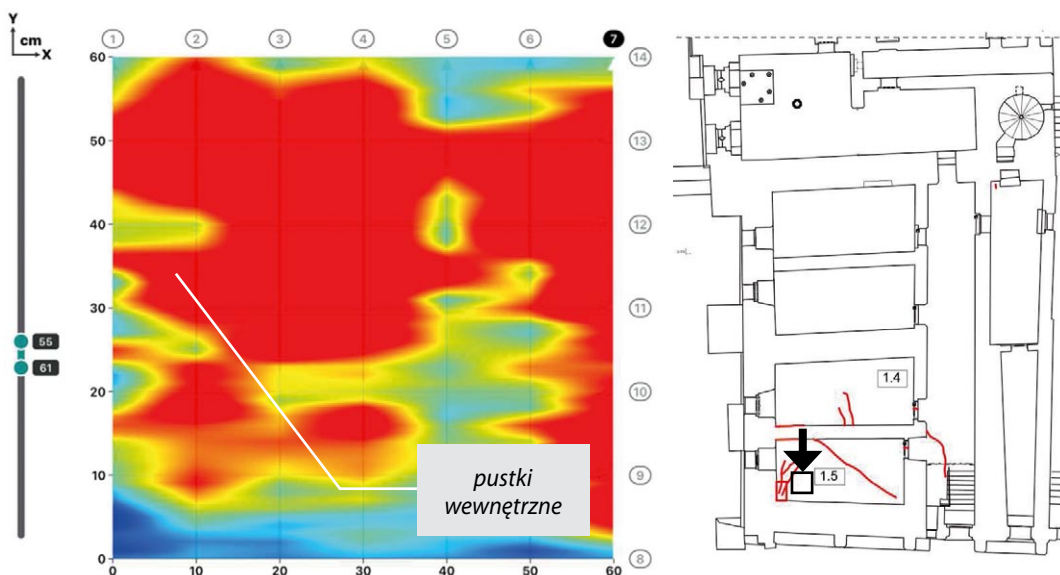
Rys. 15. Badania posadzki w piwnicy tomografem ultradźwiękowym PD8000; wykryto pustki pod posadzką



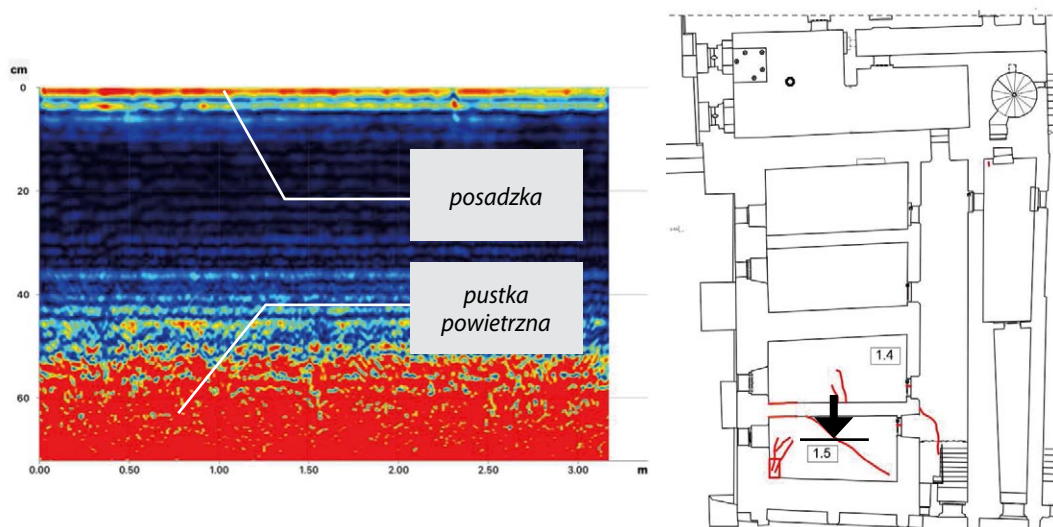
Rys. 16. Skan powierzchniowy ściany radarem PG8000; wykryto pustki wewnętrzne za rysą



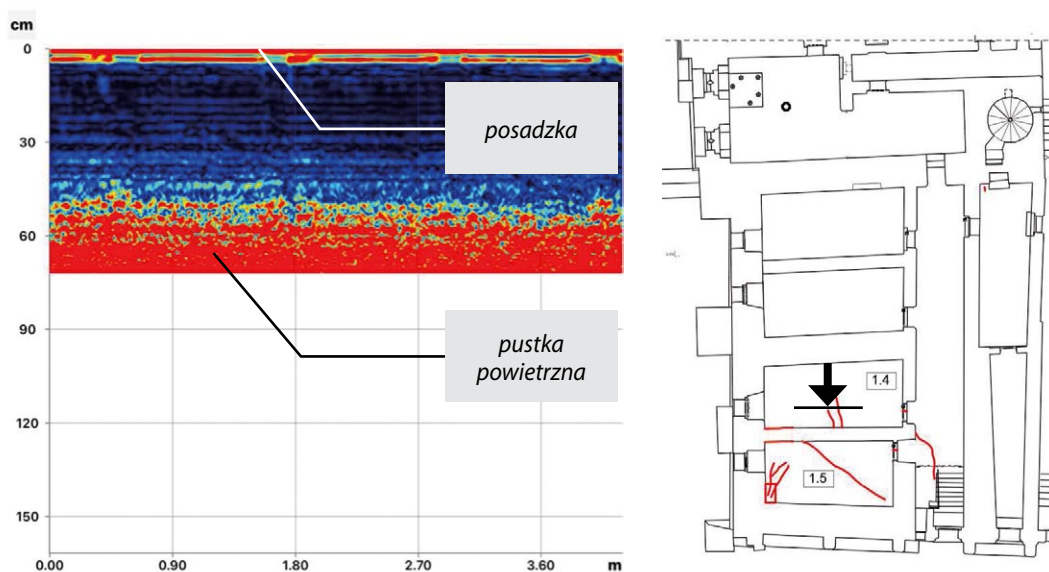
Rys. 17. Skan powierzchniowy posadzki radarem PG8000; pokazano widok skanu na głębokości 55–61 cm, wykryto pustki pod posadzką



Rys. 18. Skan liniowy posadzki radarem PG8000; wykryto pustkę na głębokości 55 cm



Rys. 19. Skan liniowy posadzki radarem PG8000; wykryto pustkę na głębokości 55 cm



pomiarowy o skokowo zmiennej częstotliwości w zakresie 0,2–4,0 GHz. Podczas badań częstotliwość zmienia się stopniowo w sposób automatyczny, a maksymalny czas akwizycji wynosi 20 ns. Dzięki zmienności zakresu, urządzenia są w stanie wykryć nieciągłości struktury o różnych rozmiarach na różnych głębokościach. Zakres (zasięg badania) urządzenia GP 8000 to 0,80 m, natomiast zakres GP 8800 to 0,65 m. Urządzenia wykorzystują metodę czasu przelotu (TOFM), która jednocześnie rejestruje odbierany sygnał i ruch kół w przetworniku pomiarowym. Urządzenia wysyłają sygnał o danej częstotliwości i rejestrują sygnał odbity, tworząc tzw. A-skan. Następnie w czasie rzeczywistym urządzenia łączą A-skany tworząc B-skan, czyli przekrój badanego elementu.

Badania wykonano w piwnicy Pałacu Wielkich Mistrzów. Trzema urządzeniami wykonano blisko 40 skanów liniowych i powierzchniowych. Wybrane wyniki badań pokazano na rysunkach 14–19.

Przeprowadzone badania wykazały, że wewnątrz ścian w okolicy zarysowań oraz pod posadzką piwnicy występują pustki powietrzne. Pustki wewnątrz ścian świadczą o rozluźnieniu struktury murów. Co ciekawe, w obu pomieszczeniach piwnicznych, gdzie stwierdzono zarysowania ścian i sklepień, badania wykazały występowanie pustki powietrznej na głębokości około 55 cm. Może to świadczyć o osiadaniu gruntu pod posadzką lub o występowaniu ukrytych pomieszczeń, do których obecnie nie ma dostępu. Warto nadmienić, że w innych rejonach Pałacu Wielkich Mistrzów piwnice mają więcej kondygnacji.

5. Przyczyny powstania uszkodzeń

Przyczyną powstania uszkodzeń są zapewne nierównomierne osiadania podłoża gruntowego, a co za tym idzie nierównomierne osiadania części budynku Pałacu Wielkich Mistrzów. Obraz zarysowań oraz wyniki badań nieniszczących i geodezyjnych pozwalają przypuszczać, że osiadają południowo-wschodnie ściany poprzeczne, a wraz z nimi przynajmniej dwa filary sklepień palmowych. W celu poznania dokładnej przyczyny osiadań podłoża gruntowego konieczne będzie rozszerzenie zakresu badań o dalsze badania nieniszczące (badania geofizyczne) oraz badania inwazyjne, takie jak: odwierty wraz z badaniami endoskopowymi, odwierty geotechniczne oraz odkrywki fundamentów ściany południowo-wschodniej. Dopiero po określeniu przyczyn osiadań możliwe będzie zaprojektowanie efektywnego sposobu naprawy. Zalecono dalsze prowadzenie monitoringu geodezyjnego. Przeprowadzenie badań inwazyjnych oraz napraw obiektu wymaga uzgodnienia z Wojewódzkim Konserwatorem Zabytków.

6. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych oględzin, badań makroskopowych, badań nieniszczących, pomiarów geodezyjnych

i analiz budynku Pałacu Wielkich Mistrzów na Zamku Średnim w Malborku stwierdza się, że:

- na ścianach i sklepieniach piwnic i wysokiego parteru występują zarysowania, których rozwarcie sięga 4 mm. Lokalnie w piwnicy występują spękania o rozwarciu do 30 mm. Zarysowania koncentrują się w okolicy południowo-wschodniej części budynku;
- pomiary geodezyjne wykazały, że od roku 2009 wzrost rozwarcia spękań w piwnicy wyniósł 18,1 mm oraz 16,1 mm;
- wykonane badania nieniszczące radarami i tomografem ultradźwiękowym wykazały, że wewnątrz ścian w okolicy zarysowań oraz pod posadzką piwnicy występują pustki powietrzne;
- przyczyną powstania uszkodzeń są bez wątpienia nierównomierne osiadania podłoża gruntowego, a wraz z nim nierównomierne osiadania części budynku Pałacu Wielkich Mistrzów;
- w celu poznania dokładnej przyczyny osiadań podłoża gruntowego konieczne będzie rozszerzenie zakresu badań o dalsze badania nieniszczące oraz odwierty niszczące.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ajdukiewicz A., Ocena konstrukcyjna koncepcji zabezpieczeń zachodniej ściany Zamku Średniego w Malborku, *Inżynieria i Budownictwo* 8/1992, str. 280–282
- [2] Ajdukiewicz A., Kliszczewicz A., Hulimka J., Analiza ustroju nośnego skrzydła zachodniego Zamku Średniego w Malborku, *Inżynieria i Budownictwo* 8/1992, str. 276–279
- [3] Albrecht J., Problemy wzmocnienia ściany zachodniej Zamku Średniego w Malborku, *Inżynieria i Budownictwo* 7/1991, str. 279–282
- [4] Mierzwiński M., Zabezpieczenie zachodniego skrzydła Zamku Średniego w Malborku, *Ochrona Zabytków* 47/2(185)1994, str. 123–137
- [5] Drobiec Ł., Przyczyny uszkodzeń murów, XXII Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk, 7–10 marca 2007, t. I, str. 105–147
- [6] Drobiec Ł., Przyczyny awarii i katastrof obiektów zabytkowych, *Monografia Awarie budowlane, Zapobieganie, diagnostyka, naprawy, rekonstrukcje*, Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, str. 33–52
- [7] Drobiec Ł., Naprawa rys i wzmocnienia murowanych ścian, XXX Jubileuszowe Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk 25–28 marca 2015, tom I, str. 323–398
- [8] Drobiec Ł., Renowacje konstrukcji obiektów zabytkowych. Systematyka – uszkodzenia – naprawy. Część I–II, *Archimedia*, Warszawa, 2018, 2019, 2022
- [9] Pospieszny K., Architektura rezydencji wielkiego mistrza w Malborku w kontekście europejskim, artykuł opracowany w ramach grantu Narodowego Centrum Nauki nr 2013/09/B/HS3/03487
- [10] Pospieszny K., *Domus Malbork. Krzyżacki zamek konwentualny w typie regularnym*, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń, 2014
- [11] Trupinda J., O pomieszczeniach kancelarii i archiwum wielkiego mistrza w Malborku na podstawie źródeł pisanych w XIV w. i XV wieku, [w:] J. Trupinda (red.) *Kancelarie krzyżackie. Stan badań i perspektywy badawcze*, Malbork, 2002, str. 255–272
- [12] Wiśniewski J., Symbolika i znaczenie zamku krzyżackiego w Malborku. *Studia Elbląskie* 13/2012, str. 7–25