

Noëlla Dolińska*

orcid.org/0009-0007-7163-0375

Gabriela Wojciechowska**

orcid.org/0000-0001-7041-5373

Łukasz Bednarz***1

orcid.org/0000-0002-1245-6027

Monitoring obiektów sakralnych Śląska i Górnych Łużyc z wykorzystaniem Internetu Rzeczy (IoT)

Część 1: Uwarunkowania historyczne, typologie i rozwiązania techniczne

Monitoring of Religious Heritage Buildings in Silesia and Upper Lusatia Using the Internet of Things (IoT), Part 1: Historical Context, Typologies and Technical Solutions

Słowa kluczowe: obiekty sakralne, monitoring, Internet Rzeczy (IoT), zarządzanie jakością, Śląsk, Górne Łużycze, ochrona dziedzictwa

Keywords: religious heritage buildings, monitoring, Internet of Things (IoT), quality management, Silesia, Upper Lusatia, heritage conservation

Wprowadzenie

Rozwój technologii Internetu Rzeczy stwarza nowe możliwości przewyższania tych wyzwań. Ciągły monitoring umożliwia długoterminową obserwację parametrów środowiskowych i konstrukcyjnych bez konieczności ingerencji w substancję zabytkową. Bezprzewodowe czujniki oraz niskoenergetyczne systemy komunikacji mogą być dostosowane do specyfiki historycznych wnętrz, często rozmieszczonych w znacznej od siebie odległości. Odpowiednio wdrożone systemy dostarczają danych wspierających konserwację prewencyjną oraz umożliwiających pogłębienie wiedzy na temat zachowania się obiektów budowlanych.

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie analizy możliwości ciągłego monitorowania opartego na technologii Internetu Rzeczy, zastosowanego w odniesieniu do historycznych kościołów. Praca koncen-

Introduction

The development of Internet of Things technology creates new opportunities for addressing these challenges. Continuous monitoring enables long-term observation of environmental and structural parameters without interfering with a building's historic fabric. Wireless sensors and low-power communication systems can be adapted to the specific conditions of historic interiors, which are often widely dispersed or difficult to access. When properly implemented, such systems provide data that support preventive conservation and deepen understanding of historic building behavior.

This article presents an analysis of the potential of continuous monitoring based on Internet of Things technology as applied to historic churches. The study focuses on structural types characteristic

* mgr inż., Szkoła Doktorska Politechniki Wrocławskiej, Wydział Zarządzania

** mgr inż. arch., Szkoła Doktorska Politechniki Wrocławskiej, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

***dr hab. inż., prof. Politechniki Wrocławskiej, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

* *M.Sc. Eng., Doctoral School, Wrocław University of Science and Technology, Faculty of Management*

** *M.Sc. Eng. Arch., Doctoral School, Wrocław University of Science and Technology, Faculty of Civil Engineering*

****D.Sc. Ph.D. Eng., University Professor, Wrocław University of Science and Technology, Faculty of Civil Engineering*

Cytowanie / Citation: Dolińska N., Wojciechowska G., Bednarz Ł. Monitoring of Religious Heritage Buildings in Silesia and Upper Lusatia Using the Internet of Things (IoT), Part 1: Historical Context, Typologies and Technical Solutions. *Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation* 2026, 86S:261–273

Otrzymano / Received: 29.03.2025 • **Zaakceptowano / Accepted:** 18.04.2026

doi: 10.48234/WK86SMONITORING

Praca dopuszczona do druku po recenzjach

Article accepted for publishing after reviews

truje się na typach konstrukcji charakterystycznych dla tego obszaru, parametrach możliwych do pomiaru w obiektach murowanych i drewnianych oraz metodach interpretacji danych monitoringowych w kontekście ochrony konserwatorskiej.

Metodologia

Zastosowane w niniejszym opracowaniu podejście metodologiczne zostało zaprojektowane w taki sposób, aby odzwierciedlać interdyscyplinarny charakter badań nad ochroną dziedzictwa oraz ich praktyczną orientację. Zamiast eksperymentalnych badań pojedynczego obiektu przedstawiono ramy analityczne oparte na syntezie wdrożonych systemów monitoringu, wyników opublikowanych badań oraz doświadczeń praktyki konserwatorskiej odnoszących się do historycznych kościołów Śląska i Górnych Łużyc.

Rodzaje czujników i architektury systemów oceniano w odniesieniu do zachowania materiałów charakterystycznych dla regionu. W wypadku kościołów murowanych szczególną uwagę poświęcono takim parametrom, jak rozkład wilgoci, rozwój spękań, oddziaływania termiczne oraz drgania [Lourenço 2002]. Dla obiektów drewnianych oraz elementów konstrukcyjnych z drewna analizowano reakcję na wilgotność, deformacje oraz długoterminowe obciążenia materiałowe. Systemy monitorujące uznaje się za skuteczne wyłącznie wtedy, gdy respektują historyczną substancję obiektu i mogą funkcjonować przez długi czas przy minimalnych wymaganiach konserwacyjnych.

Interpretację danych monitoringu prowadzono z perspektywy konserwatorskiej. Dane krótkoterminowe wykorzystywano do identyfikacji bezpośrednich reakcji na zmiany środowiskowe lub wzorce użytkowania, natomiast zbiory danych długoterminowych analizowano w celu rozpoznania cykli sezonowych, stopniowych trendów oraz potencjalnych zagrożeń. Omawiane w pracy metody predykcyjne obejmują zarówno prostą analizę trendów, jak i zaawansowane podejścia oparte na analizie danych. Metody te są traktowane jako narzędzia wspierające ocenę ekspercką, a nie jako autonomiczne mechanizmy decyzyjne.

Metodyka badań w sposób jawny uwzględnia ograniczenia wynikające z dostępności danych, zróżnicowania obiektów oraz złożoności struktur historycznych. Ograniczenia te uznaje się za immanentne dla badań nad dziedzictwem i uwzględnia się je poprzez ostrożną interpretację kontekstową, a nie uogólnienia statystyczne. Takie podejście zapewnia, że uzyskane wyniki pozostają użyteczne z punktu widzenia praktyki konserwatorskiej i mogą być odnoszone do szerokiego spektrum historycznych kościołów Śląska i Górnych Łużyc.

Typologie kościołów na Śląsku i Górnych Łużycach oraz ich znaczenie dla monitoringu

Miejskie kościoły z okresu reformacji na Śląsku łączą zazwyczaj ceglana lub kamienną konstrukcję murów

of this region, parameters that can be measured in masonry and timber buildings, and methods for interpreting monitoring data in the context of heritage conservation.

Methodology

The methodological approach adopted in this study reflects both the interdisciplinary nature of heritage conservation research and its practical orientation. Rather than presenting the results of an experimental investigation of a single building, the paper proposes an analytical framework based on the synthesis of implemented monitoring systems, published research findings, and practical conservation experience related to historic churches in Silesia and Upper Lusatia.

The paper evaluated sensor types and monitoring system architectures with reference to the behavior of materials characteristic of the region. For masonry churches, particular attention was given to parameters such as moisture distribution, crack development, thermal effects, and vibrations [Lourenço 2002]. For timber buildings and timber structural components, the analysis focused on responses to humidity, deformation processes, and long-term material loading. Monitoring systems are effective only when they respect the historic fabric of the building and can operate over extended periods with minimal maintenance.

We interpreted monitoring data from a conservation perspective. Short-term datasets were used to identify direct responses to environmental changes and usage patterns, whereas long-term datasets were analyzed to detect seasonal cycles, gradual trends, and potential risks. The predictive methods discussed in this paper include both simple trend analysis and advanced data-driven approaches. These methods are tools that support expert assessment rather than autonomous decision-making mechanisms.

The research methodology explicitly acknowledges limitations arising from data availability, the diversity of heritage assets, and the complexity of historic structures. Such limitations are considered inherent to heritage research and are addressed through careful contextual interpretation rather than statistical generalization. This approach ensures that the findings remain relevant to conservation practice and applicable to a broad range of historic churches in Silesia and Upper Lusatia.

Church typologies in Silesia and Upper Lusatia and their significance for monitoring

Urban churches dating from the Reformation period in Silesia typically combine brick- or stone-masonry walls with complex roof structures and massive towers. Their interiors were often identified by the introduction of galleries, which changed load-transfer

ze złożonymi układami dachowymi oraz masywnymi wieżami. Ich wnętrza były często reorganizowane poprzez wprowadzanie empor, co prowadziło do zmiany schematów przenoszenia obciążeń oraz pojawienia się nowych źródeł drgań związanych z ruchem wiernych, a także pracą organów i dzwonów. Obiekty te wykazują powolne deformacje, rozwój spękań w rejonach sklepień i łuków oraz zróżnicowany rozkład wilgoci w grubych murach. Z tego względu długoterminowy monitoring dynamiczny oraz obserwacja procesów wilgotnościowych mają kluczowe znaczenie dla identyfikacji zagrożeń i kalibracji modeli w kontekście ochrony dziedzictwa [Gentile et al. 2019; Venanzi et al. 2020; Boscato et al. 2016]. Na Górnych Łużycach oraz w części Dolnego Śląska wiele kościołów wiejskich ma konstrukcję drewnianą lub ryglową. Reagują one szybko na zmiany wilgotności poprzez cykliczne pęcznienie i skurcz drewna, przemieszczenia połączeń oraz długotrwałe naprężenia w elementach konstrukcyjnych. Monitoring zawartości wilgoci w drewnie, odkształceń elementów konstrukcyjnych oraz lokalnych przemieszczeń, połączony z obserwacją mikroklimatu, jest niezbędny do wczesnego ostrzegania oraz dostosowywania strategii ogrzewania i wentylacji w ramach konserwacji zorientowanej na użytkowanie obiektu [Di Trapani et al. 2024; La Mendola et al. 2023].

Kościół graniczny i ucieczkowy, zlokalizowane w pobliżu linii saskośląskiej, odzwierciedlają szybkie i często realizowane przy ograniczonych zasobach procesy budowlane, peryferyjne usytuowanie oraz częste narażenie na silne wiatry i skrajne temperatury. Warunki te zwiększają ryzyko osiadań, pęknięć murów oraz niekorzystnych oddziaływań dynamicznych na konstrukcje dzwonnice. Ponieważ wiele z tych obiektów znajduje się w niewielkich miejscowościach lub w rozproszonych krajobrazach, technologie szerokopasmowej komunikacji niskoenergetycznej oraz autonomiczne źródła zasilania stanowią praktyczną podstawę wdrażania ciągłego monitoringu. W takich przypadkach sieci mieszane, wykorzystujące technologię LoRaWAN w połączeniu z okresowym przesyłem danych przez sieci komórkowe, umożliwiają zapewnienie ciągłości rejestracji przy jednoczesnym poszanowaniu integralności historycznej substancji [Dolińska et al. 2025; Ayyildiz et al. 2019]. W sytuacji, gdy wieże są wysokie i smukłe, drgania wywołane wiatrem oraz pracą dzwonów mogą maskować długoterminowe zmiany modalne. Rozdzielenie krótkotrwałych wymuszeń od sezonowych wpływów środowiskowych wymaga stabilnego rozmieszczenia czujników oraz długich szeregów czasowych umożliwiających interpretację dobowych i sezonowych zmian parametrów dynamicznych [Ramírez et al. 2022; Zonno et al. 2018; Boscato et al. 2016].

Kościół drewniany oraz obiekty sakralne o konstrukcji ryglowej stanowią odrębną i często spotykaną typologię regionalną na Górnych Łużycach. Ich profil zagrożeń konserwatorskich jest zdominowany przez procesy zależne od wilgoci oraz aktywność biologiczną. Ciągły monitoring zawartości wilgoci w drewnie i temperatury, w połączeniu z pomiarem wilgotności

mechanizmów i wprowadził nowe źródła drgań z wibracji z kongregacyjnego ruchu, jak również z działania organów i dzwonów. Te budynki wykazują powolne deformacje, rozwój pęknięć w sklepieniach i łukach, oraz nierównomierny rozkład wilgoci w grubych murach. Z tego powodu, długoterminowy monitoring dynamiczny i obserwacja procesów związanych z wilgocią mają kluczowe znaczenie dla identyfikacji zagrożeń i kalibracji modeli w kontekście konserwacji [Gentile et al. 2019; Venanzi et al. 2020; Boscato et al. 2016].

W Górnej Łużycy i części Dolnego Śląska, wiele wiejskich kościołów ma konstrukcję drewnianą lub ryglową. Szybko reagują na zmiany wilgotności poprzez cykliczne pęcznienie i skurcz drewna, przemieszczenia połączeń oraz długotrwałe naprężenia w elementach konstrukcyjnych. Ciągły monitoring zawartości wilgoci w drewnie, odkształceń elementów konstrukcyjnych oraz lokalnych przemieszczeń, połączony z obserwacją mikroklimatu, jest niezbędny do wczesnego ostrzegania oraz dostosowywania strategii ogrzewania i wentylacji w ramach konserwacji zorientowanej na użytkowanie obiektu [Di Trapani et al. 2024; La Mendola et al. 2023].

Kościół graniczny i ucieczkowy, zlokalizowane w pobliżu linii saskośląskiej, odzwierciedlają szybkie i często realizowane przy ograniczonych zasobach procesy budowlane, peryferyjne usytuowanie oraz częste narażenie na silne wiatry i skrajne temperatury. Warunki te zwiększają ryzyko osiadań, pęknięć murów oraz niekorzystnych oddziaływań dynamicznych na konstrukcje dzwonnice. Ponieważ wiele z tych obiektów znajduje się w niewielkich miejscowościach lub w rozproszonych krajobrazach, technologie szerokopasmowej komunikacji niskoenergetycznej oraz autonomiczne źródła zasilania stanowią praktyczną podstawę wdrażania ciągłego monitoringu. W takich przypadkach sieci mieszane, wykorzystujące technologię LoRaWAN w połączeniu z okresowym przesyłem danych przez sieci komórkowe, umożliwiają zapewnienie ciągłości rejestracji przy jednoczesnym poszanowaniu integralności historycznej substancji [Dolińska et al. 2025; Ayyildiz et al. 2019]. W sytuacji, gdy wieże są wysokie i smukłe, drgania wywołane wiatrem oraz pracą dzwonów mogą maskować długoterminowe zmiany modalne. Rozdzielenie krótkotrwałych wymuszeń od sezonowych wpływów środowiskowych wymaga stabilnego rozmieszczenia czujników oraz długich szeregów czasowych umożliwiających interpretację dobowych i sezonowych zmian parametrów dynamicznych [Ramírez et al. 2022; Zonno et al. 2018; Boscato et al. 2016].

Kościół drewniany oraz obiekty sakralne o konstrukcji ryglowej stanowią odrębną i często spotykaną typologię regionalną na Górnych Łużycach. Szybko reagują na zmiany wilgotności poprzez cykliczne pęcznienie i skurcz drewna, przemieszczenia połączeń oraz długotrwałe naprężenia w elementach konstrukcyjnych. Ciągły monitoring zawartości wilgoci w drewnie i temperatury, w połączeniu z pomiarem wilgotności

względnej i obserwacją mikroklimatu przy powierzchni przegród, pozwala na wyznaczanie praktycznych progów decyzyjnych służących sterowaniu wentylacją i ogrzewaniem. Elementy drewniane o niewielkiej masie reagują szybko, co sprawia, że rejestracja danych o wysokiej częstotliwości jest szczególnie przydatna do identyfikacji zdarzeń, zaś uśrednianie długoterminowe umożliwia rozpoznanie sezonowych przesunięć oraz trwałych odchyłń mikroklimatycznych związanych ze sposobem użytkowania obiektu. W konstrukcjach mieszanych, w których współlistnieją drewno i mur, szczególnej uwagi wymagają różnicowe przemieszczenia w strefach styku, monitorowane za pomocą czujników odkształceń lub przemieszczeń [Scuro et al. 2021; Yan et al. 2018].

Warunki klimatyczne regionu oraz wzorce użytkowania dodatkowo wzmacniają przedstawione potrzeby techniczne. Wiele kościołów jest ogrzewanych jedynie okresowo i podlega wyraźnym sezonowym zmianom wilgotności. Ruch turystyczny związany z dziedzictwem reformacji intensyfikuje lokalne zmiany mikroklimatyczne podczas wydarzeń. W wypadku murów sprzyja to zwiększeniu gradientów wilgotności oraz ryzyka kondensacji powierzchniowej, zagrażającej polichromiom i wyposażeniu. W konstrukcjach drewnianych prowadzi to do krótkotrwałych cykli wilgotnościowych, które obciążają połączenia i przyspieszają procesy zmęczeniowe materiału. Ciągły monitoring, umożliwiający rozróżnienie krótkotrwałych pików od trendów długoterminowych, jest zatem szczególnie adekwatny do tych regionalnych uwarunkowań i wspiera działania konserwatorskie o charakterze prewencyjnym, zamiast napraw reaktywnych [Rossi, Bournas 2023; Sofi et al. 2022].

Tabela 1 zestawia reprezentatywne typologie kościołów Śląska i Górnych Łużyc, wskazując dominujące materiały, cechy regionalne, główne podatności oraz priorytety monitoringu. Zestawienie to pozwala odróżnić parametry i wymagania systemowe charakterystyczne dla regionu od ujęć ogólnych, spotykanych w literaturze dotyczącej monitoringu konstrukcji.

Rycina 1 przedstawia schemat decyzyjny służący do określania priorytetów monitoringu na obszarze Śląska i Górnych Łużyc w zależności od typologii obiektu oraz występujących ograniczeń. Proces rozpoczyna się od identyfikacji typologii kościoła, a następnie obejmuje określenie materiałów i systemu konstrukcyjnego, ocenę dostępu do obiektu, możliwości zasilania i łączności, a także identyfikację kluczowych czynników ryzyka, takich jak wilgoć, deformacje czy drgania. Efektem końcowym jest zestawienie konfiguracji czujników, częstotliwości akwizycji danych oraz wstępnego planu analizy, dostosowanych do specyfiki danego obiektu i jego kontekstu konserwatorskiego. Rycina ma na celu wspomaganie etapu planowania oraz ułatwienie komunikacji pomiędzy inżynierami, konserwatorami zabytków i przedstawicielami parafii [Rossi, Bournas 2023; Scuro et al. 2021].

Przedstawione powyżej typologie regionalne uzasadniają zróżnicowanie priorytetów w zakresie monitoringu. W wypadku miejskich kościołów murowa-

ticularly useful for event detection, while long-term averaging enables the identification of seasonal shifts and persistent microclimatic deviations associated with building use. In mixed structures where timber and masonry coexist, pay particular attention to differential displacements at material interfaces, monitored using strain or displacement sensors [Scuro et al. 2021; Yan et al. 2018].

Regional climatic conditions and usage patterns further reinforce these technical requirements. Many churches are heated only intermittently and experience pronounced seasonal humidity variations. Heritage tourism associated with the legacy of the Reformation intensifies local microclimatic fluctuations during events. In masonry buildings, this increases moisture gradients and raises the risk of surface condensation that threatens wall paintings and movable furnishings. In timber structures, it creates short-term moisture cycles that stress joints and accelerate material fatigue. Continuous monitoring that can distinguish short-term peaks from long-term trends is therefore particularly well suited to these regional conditions and supports preventive conservation measures rather than reactive repairs [Rossi, Bournas 2023; Sofi et al. 2022].

Table 1 summarizes representative church typologies in Silesia and Upper Lusatia, identifying dominant materials, regional characteristics, principal vulnerabilities, and monitoring priorities. This overview makes it possible to distinguish region-specific parameters and system requirements from the more general approaches commonly encountered in the structural monitoring literature.

Figure 1 presents a decision tree used to determine monitoring priorities in the Silesia and Upper Lusatia regions based on the building typology and existing constraints. The process begins by identifying the type of church, then determining the materials and structural system, assessing access to the building, power and communication capabilities, and identifying key risk factors such as moisture, deformations, or vibrations. The result is a summary of the sensor configuration, data acquisition frequency, and a preliminary analysis plan, tailored to the building's specific characteristics and conservation context. The illustration supports the planning phase and facilitates communication between engineers, historic building conservators, and parish representatives [Rossi, Bournas 2023; Scuro et al. 2021].

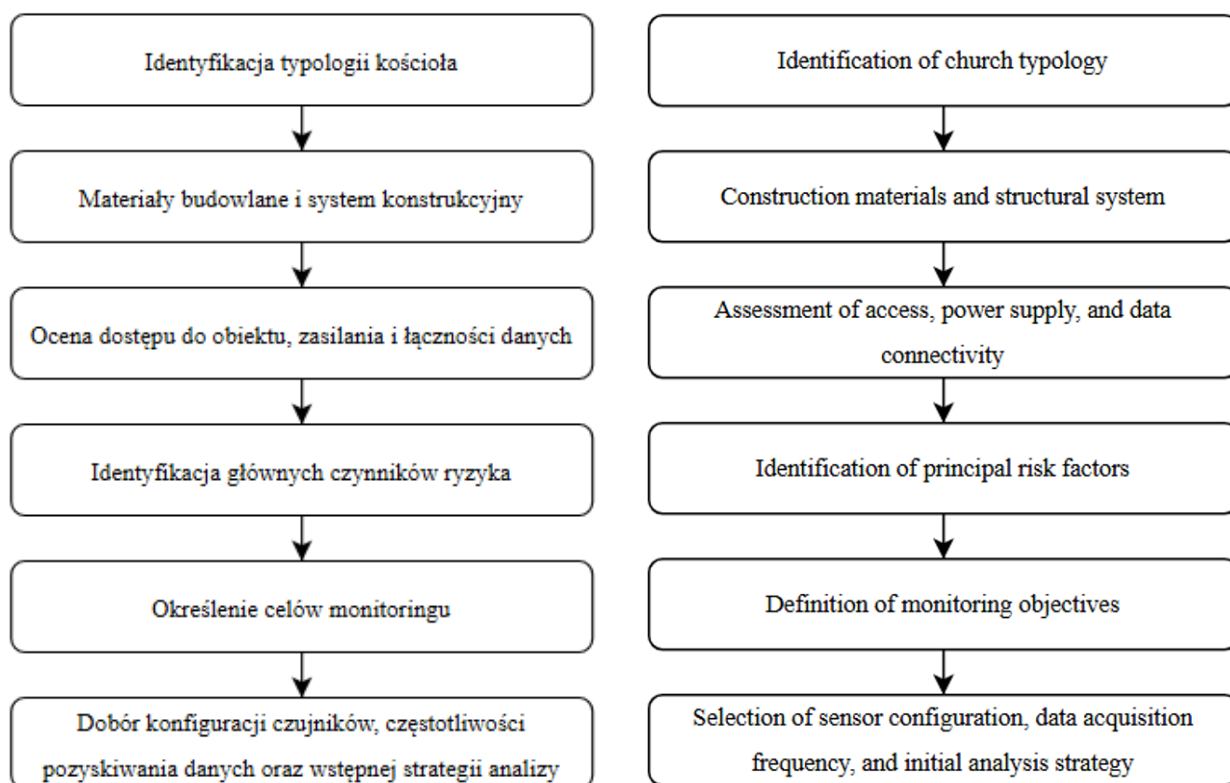
The regional typologies presented above justify differentiating monitoring priorities. For urban masonry churches with towers, longtime series and modal analysis are required to distinguish environmental influences from structural changes and to correlate bell-operation events with the structure's dynamic response. For rural masonry churches, the main factors driving deterioration are moisture transport and thermal gradients within thick masonry walls,

Typologia obiektu	Dominujące materiały	Cechy regionalne	Główne podatności	Priorytety monitoringu	Uwagi dotyczące instalacji i systemu
Miejskie kościoły okresu reformacji z wieżami	Mur ceglany lub kamienny z drewnianą konstrukcją dachową	Empory i zreorganizowane wnętrza, masywne wieże w zwartej zabudowie miejskiej	Powolne deformacje, rozwój spękań, naprężenia w sklepieniach i łukach, drgania wież	Długoterminowe trendy rozwarcia rys i przemieszczeń, właściwości dynamiczne, mikroklimat wnętrz	Odwracalne mocowania w kamieniu i tynku, stabilne punkty odniesienia, sieci mieszane WiFi i komórkowe tam, gdzie to możliwe [Ercan 2018; Venanzi et al. 2020]
Wiejskie kościoły murowane	Mur o konstrukcji mieszanej z elementami drewnianymi	Ogrzewanie okresowe, użytkowanie sezonowe, ograniczona obsługa techniczna	Migracja wilgoci w grubych murach, cykle zamrażania i krystalizacji soli, gradienty termiczne	Profile wilgotności i temperatury murów, wilgotność względna przy powierzchni, reakcja termiczna	Dyskretne węzły bezprzewodowe o niskiej widoczności, LoRaWAN zapewniający zasięg, zasilanie bateryjne o wieloletniej trwałości [Rossi, Bournas 2023; Dolińska et al. 2025]
Kościoły graniczne i ucieczkowe w pobliżu granicy saskośląskiej	Mur z drewnianymi dachami, niekiedy konstrukcja mieszana	Peryferyjne użytkowanie, szybkie historyczne wzniesienie, narażenie na wiatr	Osiadania, aktywacja spękań, drgania wywołane wiatrem i pracą dzwonów	Spękania i przechyły w strefach wrażliwych, drgania zdarzeniowe, mikroklimat	LoRaWAN lub rozwiązania hybrydowe z okresowym przesyłem komórkowym, autonomiczne zasilanie, minimalizacja okablowania [Ayyildiz et al. 2019; Ramírez et al. 2022]
Kościoły drewniane	Konstrukcja drewniana, niekiedy zrębowa lub ramowa	Silna reprezentacja regionalna na Górnych Łużycach, lekkie przegrody	Cykle wilgotnościowe, ruchy połączeń, zagrożenia biologiczne	Zawartość wilgoci w drewnie, odkształcenia elementów drewnianych, lokalne przemieszczenia	Mocowania klipsowe lub opaskowe, czujniki o małych gabarytach, wysoka częstotliwość rejestracji zdarzeń [Di Trapani et al. 2024; Yan et al. 2018]
Kościoły o konstrukcji ryglowej	Szkielet drewniany z wypełnieniem murem lub glinianym	Technika przejściowa, wrażliwość stref styków materiałowych	Różnicowe przemieszczenia, odspojenia wypełnień, wilgoć w strefach styku	Odształcenia i przemieszczenia w strefach styku, wilgotność wypełnień, wilgotność względna i temperatura	Podwójne pomiary po obu stronach złączy, odwracalne uchwyty montażowe, sieci niskoenergetyczne [Scuro et al. 2021; Dolińska et al. 2025]

Tab. 1. Reprezentatywne typologie kościołów na Śląsku i Górnych Łużycach oraz ich implikacje dla monitoringu; wszystkie tabele i ryciny opracowane przez autorów

Building typology	Dominant materials	Regional characteristics	Main vulnerabilities	Monitoring priorities	Installation and system considerations
Urban Reformation-period churches with towers	Brick or stone masonry with timber roof structures	Galleries and reorganized interiors, massive towers within dense urban settings	Slow deformations, crack development, stresses in vaults and arches, tower vibrations	Long-term trends in crack opening and displacements, dynamic properties, indoor microclimate	Reversible fixings in stone and plaster, stable reference points, hybrid Wi-Fi and cellular networks where available [Ercan 2018; Venanzi et al. 2020]
Rural masonry churches	Mixed masonry construction with timber elements	Intermittent heating, seasonal use, limited technical maintenance	Moisture migration in thick walls, freeze-thaw and salt-crystallization cycles, thermal gradients	Moisture and temperature profiles within walls, near-surface relative humidity, thermal response	Discreet low-visibility wireless nodes, LoRaWAN for extended coverage, long-life battery-powered systems [Rossi, Bournas 2023; Dolińska et al. 2025]
Border and refuge churches near the Saxon-Silesian border	Masonry structures with timber roofs, occasionally mixed construction	Peripheral location, rapid historic construction, exposure to wind	Settlement, crack activation, wind- and bell-induced vibrations	Cracks and inclinations in vulnerable zones, event-based vibrations, microclimate	LoRaWAN or hybrid solutions with periodic cellular transmission, autonomous power supply, minimized cabling [Ayyildiz et al. 2019; Ramírez et al. 2022]
Timber churches	Timber construction, sometimes log-built or frame-based	Strong regional presence in Upper Lusatia, lightweight building envelopes	Moisture cycles, joint movements, biological deterioration	Timber moisture content, deformation of timber members, local displacements	Clip or strap mounting systems, compact sensors, high-frequency event recording [Di Trapani et al. 2024; Yan et al. 2018]
Timber-frame churches	Timber frame with masonry or earthen infill	Transitional construction technique, sensitivity of material interface zones	Differential displacements, infill detachment, moisture accumulation at interfaces	Deformations and displacements at material interfaces, infill moisture content, relative humidity and temperature	Dual-sided measurements across joints, reversible mounting systems, low-power communication networks [Scuro et al. 2021; Dolińska et al. 2025]

Table 1. Representative church typologies in Silesia and Upper Lusatia and their monitoring implications; all tables and figures prepared by the authors



Ryc. 1. Schemat decyzyjny określania priorytetów monitoringu na Śląsku i Górnych Łużycach

Fig. 1. Decision-making framework for establishing monitoring priorities in Silesia and Upper Lusatia

nych z wieżami niezbędne są długie szeregi czasowe oraz analiza modalna, umożliwiające rozdzielenie wpływów środowiskowych od zmian konstrukcyjnych, a także powiązanie zdarzeń związanych z pracą dzwonów z dynamiczną odpowiedzią konstrukcji. W odniesieniu do wiejskich kościołów murowanych głównymi czynnikami prowadzącymi do degradacji są transport wilgoci oraz gradienty termiczne w grubych murach, co wymaga ciągłego monitoringu mikroklimatu oraz okresowych, pogłębionych badań wilgotnościowych. W wypadku kościołów drewnianych i o konstrukcji ryglowej kluczowe znaczenie mają pomiary zawartości wilgoci oraz ruchów połączeń, co wiąże się z koniecznością stosowania wyższych częstotliwości rejestracji oraz starannego montażu czujników z wykorzystaniem odwracalnych mocowań, nienaruszających historycznej substancji drewna. W kościołach granicznych i ucieczkowych o doborze sieci komunikacyjnej i strategii zasilania często decydują uwarunkowania logistyczne, co podkreśla znaczenie architektur niskoenerygetycznych oraz niezawodnego buforowania danych w celu uniknięcia ich utraty podczas przerw w łączności [Ramírez et al. 2022; Zonno et al. 2018].

Wnioski wynikające z przyjętych typologii pozostają spójne z szerszym dorobkiem literatury dotyczącej monitoringu stanu technicznego konstrukcji oraz praktyki konserwatorskiej [Mishra et al. 2022; Saravanan et al. 2024]. Ich wdrożenie na Śląsku i Górnych Łużycach zależy jednak od złożonych relacji pomiędzy lokalnym

requiring continuous microclimatic monitoring and periodic in-depth moisture investigations. In timber churches and timber-frame structures, moisture-content and joint-movement measurements are primary, requiring higher data-acquisition frequencies and careful sensor installation using reversible fixing methods that do not disturb the historic timber fabric. In border and refuge churches, logistical constraints often determine the selection of communication networks and power-supply strategies, highlighting the importance of low-power architectures and reliable data buffering to prevent data loss during communication interruptions [Ramírez et al. 2022; Zonno et al. 2018].

The conclusions from the adopted typologies remain consistent with the broader literature on structural health monitoring and conservation practice [Mishra et al. 2022; Saravanan et al. 2024]. Their implementation in Silesia and Upper Lusatia, however, depends on the complex relationships between local climate, building fabric, and patterns of use. Adapting monitoring plans to regional conditions ensures that continuously acquired data can be translated into conservation actions undertaken at an appropriate timescale and with minimal intervention, which constitutes the fundamental objective of preventive conservation in relation to churches of the Reformation period [Rossi, Bournas 2023; Ercan 2018; Deng, Chen 2023].

klimatem, substancją budowlaną oraz sposobem użytkowania obiektów. Dostosowanie planów monitoringu do specyfiki regionalnej zapewnia, że dane pozyskiwane w sposób ciągły przekładają się na działania konserwatorskie podejmowane we właściwej skali czasowej i przy minimalnej ingerencji, co stanowi podstawowy cel konserwacji prewencyjnej w odniesieniu do kościołów epoki reformacji [Rossi, Bournas 2023; Ercan 2018; Deng, Chen 2023].

Systemy monitoringu i parametry pomiarowe historycznych kościołów

Ciągły monitoring historycznych kościołów na obszarze Śląska i Górnych Łużyc wymaga stosowania systemów czujników, które są zarówno technicznie niezawodne, jak i zgodne z zasadami ochrony zabytków. Dobór czujników, ich rozmieszczenie oraz metody instalacji muszą być dostosowane do regionalnych tradycji budowlanych, a także do uwarunkowań prawnych i etycznych związanych z ochroną dziedzictwa. W niniejszym rozdziale przedstawiono główne kategorie czujników stosowanych w monitoringu kościołów, omówiono inwazyjne i nieinwazyjne sposoby instalacji oraz zarysowano rozwiązania w zakresie transmisji danych i zasilania odpowiednie dla objętych ochroną konserwatorską obiektów sakralnych. Rozdział stanowi techniczny rdzeń artykułu i tworzy podstawę do dalszej dyskusji nad interpretacją danych oraz metodami predykcyjnymi.

Rodzaje czujników i mierzone parametry

Dobór czujników jest determinowany przez materiały budowlane oraz systemy konstrukcyjne typowe dla kościołów Śląska i Górnych Łużyc. Kościoły murowane, powszechnie występujące w środowisku miejskim Śląska, oraz kościoły drewniane lub o konstrukcji ryglowej, charakterystyczne dla Górnych Łużyc, wykazują odmienne reakcje fizyczne na oddziaływanie środowiskowe i eksploatacyjne, a tym samym wymagają zróżnicowanych priorytetów monitoringu.

Czujniki środowiskowe mają podstawowe znaczenie dla wszystkich typów obiektów sakralnych. Czujniki temperatury powietrza i wilgotności względnej stosuje się do obserwacji warunków mikroklimatycznych we wnętrzu naw, prezbiteriów, wież oraz przestrzeni dachowych. Dane te są kluczowe dla rozpoznania procesów degradacji materiałów, takich jak krystalizacja soli w murach czy aktywność biologiczna w elementach drewnianych. Czujniki temperatury powierzchniowej, montowane na ścianach i filarach, umożliwiają identyfikację stref zagrożonych kondensacją, szczególnie w obiektach ogrzewanych okresowo.

Czujniki konstrukcyjne służą do monitorowania mechanicznej odpowiedzi budowli. Czujniki szerokości rys i przemieszczeń wykorzystywane są w kościołach murowanych do rejestracji powolnych deformacji ścian, łuków i sklepień. Czujniki przechyłu dostarczają

Monitoring systems and measurement parameters for historic churches

Continuous monitoring of historic churches in Silesia and Upper Lusatia requires sensor systems that are both technically reliable and compatible with heritage conservation principles. Sensor selection, placement, and installation methods must adapt to regional building traditions and the legal and ethical requirements of heritage protection. This section presents the main categories of sensors used in church monitoring, discusses invasive and non-invasive installation approaches, and outlines data transmission and power-supply solutions suitable for protected religious heritage buildings. The section constitutes the technical core of the article and provides the basis for the subsequent discussion of data interpretation and predictive methods.

Sensor types and measured parameters

Sensor selection depends on the building materials and structural systems typical of churches in Silesia and Upper Lusatia. Masonry churches, common in the urban environment of Silesia, and timber or timber-frame churches, characteristic of Upper Lusatia, respond differently to environmental and operational influences and therefore require different monitoring priorities.

Environmental sensors are of fundamental importance for all types of religious buildings. Air temperature and relative humidity sensors monitor microclimatic conditions within naves, chancels, towers, and roof spaces. These data are essential for identifying material degradation processes such as salt crystallization in masonry and biological activity in timber elements. Surface temperature sensors mounted on walls and pillars help identify areas susceptible to condensation, particularly in intermittently heated buildings.

Structural sensors monitor a building's mechanical response. Crack-width and displacement sensors are applied in masonry churches to record gradual deformations of walls, arches, and vaults. Tilt sensors provide important information on the behavior of towers and high walls, where settlement or rotation may occur over decades. Vibration sensors are used primarily in bell towers and roof structures to monitor dynamic responses caused by wind action, bell operation, or human activity.

In timber churches and timber structural elements within mixed-construction buildings, material moisture sensors and strain sensors are particularly important. Timber moisture content directly affects stiffness, durability, and susceptibility to biological degradation. Continuous monitoring of moisture levels, combined with measurements of beam and joint deformation, helps identify adverse conditions before visible damage occurs. Table 2 summarizes the most commonly

istotnych informacji o zachowaniu wież oraz wysokich ścian, w których na przestrzeni dziesięcioleci może dochodzić do osiadań lub rotacji. Czujniki drgań stosuje się przede wszystkim w wieżach dzwonnych oraz na konstrukcjach dachowych w celu monitorowania odpowiedzi dynamicznej wywoływanej działaniem wiatru, pracą dzwonów lub aktywnością ludzi.

W kościołach drewnianych oraz w drewnianych elementach obiektów o konstrukcji mieszanej szczególne znaczenie mają czujniki wilgotności materiałowej oraz czujniki odkształceń. Zawartość wilgoci w drewnie bezpośrednio wpływa na jego sztywność, trwałość oraz podatność na degradację biologiczną. Ciągła obserwacja poziomu wilgoci, w połączeniu z pomiarem odkształceń belek i połączeń, umożliwia wczesne rozpoznanie niekorzystnych warunków, jeszcze przed wystąpieniem widocznych uszkodzeń. Tabela 2 zawiera zestawienie najczęściej stosowanych czujników oraz ich przydatności w odniesieniu do regionalnych typów kościołów.

Rozmieszczenie czujników i strategię instalacyjne

Rozmieszczenie czujników powinno zapewniać równowagę pomiędzy skutecznością techniczną a posza-

used sensors and their applicability to regional church typologies.

Sensor placement and installation strategies

Sensor placement should balance technical effectiveness with respect for the building's historic fabric [ICOMOS 2003]. For churches protected as cultural heritage assets, the overriding principle is to minimize intervention while maximizing the informational value obtained from monitoring. Consequently, sensors are located at structurally significant points while avoiding interference with historic materials.

Typical sensor locations in masonry churches include existing cracks and fissures, wall junctions, vault springing zones, and transitions between towers and nave structures. In timber buildings, sensors are installed in beam support areas, structural joints, and zones exposed to moisture or thermal gradients. Sensor placement strategies are always based on architectural investigations and analysis of previous conservation documentation. Figure 2 presents a schematic distribution of sensor installation zones in a historic church, indicating areas of particular relevance for environmental and structural monitoring.

Rodzaj czujnika	Mierzony parametr	Podstawowy materiał konstrukcyjny	Znaczenie konserwatorskie
Czujnik temperatury	Temperatura powietrza i powierzchni	Mur i drewno	Cykle termiczne, ryzyko kondensacji
Czujnik wilgotności	Wilgotność względna	Mur i drewno	Degradacja materiałów zależna od wilgoci
Czujnik wilgotności materiałowej	Zawartość wilgoci w materiale	Drewno, strefy styku muru i drewna	Degradacja biologiczna, aktywność soli
Czujnik rozwarcia rys	Zmienność szerokości rys	Mur	Monitoring stateczności konstrukcyjnej
Czujnik odkształceń	Odształcenia elementów	Drewno, wzmocnienia stalowe	Identyfikacja narastania naprężeń
Czujnik przechyłu	Nachylenie i rotacja	Wieże i ściany	Ocena osiadań i przemieszczeń
Czujnik drgań	Przyspieszenia i odpowiedź częstotliwościowa	Wieże, konstrukcje dachowe	Analiza zachowania dynamicznego

Tab. 2. Rodzaje czujników i mierzone parametry w historycznych kościołach Śląska i Górnych Łużyc

Sensor type	Measured parameter	Primary construction material	Conservation significance
Temperature sensor	Air and surface temperature	Masonry and timber	Thermal cycles, risk of condensation
Humidity sensor	Relative humidity	Masonry and timber	Moisture-related material degradation
Material moisture sensor	Moisture content within the material	Timber, masonry-timber interface zones	Biological deterioration, salt activity
Crack width sensor	Variation in crack width	Masonry	Monitoring of structural stability
Strain sensor	Deformation of structural elements	Timber, steel reinforcements	Identification of increasing stress levels
Tilt sensor	Inclination and rotation	Towers and walls	Assessment of settlement and displacement
Vibration sensor	Accelerations and frequency response	Towers, roof structures	Analysis of dynamic behavior

Table 2. Sensor types and measured parameters in historic churches of Silesia and Upper Lusatia

nowaniem historycznej substancji obiektu [ICOMOS 2003]. W odniesieniu do kościołów objętych ochroną konserwatorską zasadą nadrzędną jest minimalna ingerencja przy jednoczesnym uzyskaniu maksymalnej wartości informacyjnej. Z tego względu czujniki lokalizuje się w punktach istotnych z punktu widzenia zachowania konstrukcji, przy jednoczesnym unikaniu ingerencji w zabytkowe materiały.

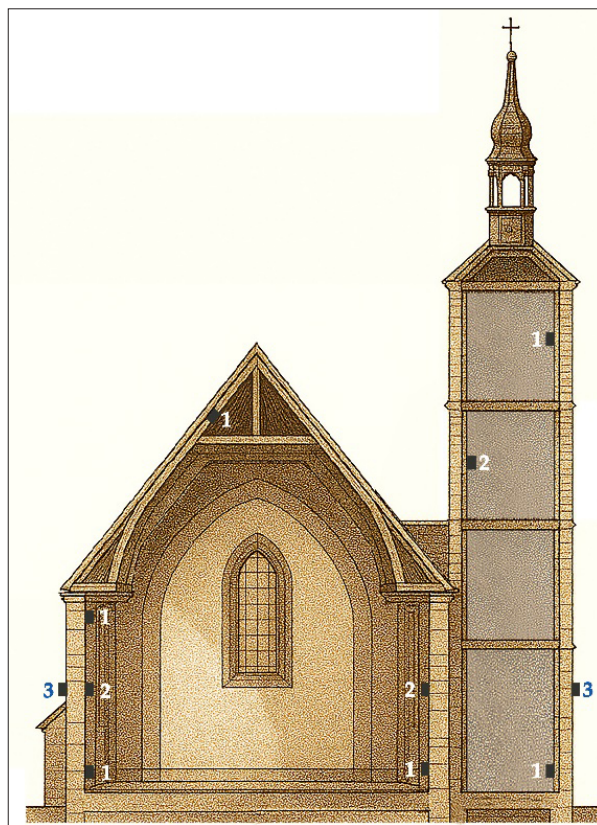
Typowe lokalizacje czujników w kościołach muryowanych obejmują istniejące rysy i spękania, strefy połączeń ścian, nasady sklepień oraz przejścia pomiędzy wieżami a korpusem nawowym. W obiektach o konstrukcji drewnianej czujniki umieszcza się w rejonach podparcia belek, w węzłach konstrukcyjnych oraz w strefach narażonych na oddziaływanie wilgoci lub gradientów temperaturowych. Strategie rozmieszczenia czujników każdorazowo opierają się na wynikach badań architektonicznych oraz analizie wcześniejszej dokumentacji konserwatorskiej. Rycina 2 przedstawia schematyczny rozkład stref instalacji czujników w historycznym kościele, wskazując obszary istotne z punktu widzenia monitoringu środowiskowego i konstrukcyjnego.

Metody instalacji w obiektach historycznych

Metody instalacji czujników najczęściej klasyfikuje się jako inwazyjne lub nieinwazyjne, przy czym w praktyce konserwatorskiej rozróżnienie to ma charakter umowny. Instalacje inwazyjne obejmują wiercenie lub trwałe mocowanie w oryginalnej substancji zabytkowej i są zasadniczo unikane lub ściśle ograniczane w historycznych kościołach. Mogą być uzasadnione jedynie w sytuacjach, gdy czujniki montowane są w obszarach wcześniej przekształconych lub gdy instalacja jest realizowana równolegle z pracami konserwatorskimi.

Metody instalacji nieinwazyjnej są preferowane i szeroko stosowane na obszarze Śląska i Górnych Łużyc. Obejmują montaż klejowy z wykorzystaniem materiałów odwracalnych, mocowanie mechaniczne za pomocą zacisków, montaż opaskowy na elementach drewnianych oraz lokalizowanie czujników w istniejących wnękach lub na powierzchniach wtórnych. Zastosowanie czujników bezprzewodowych dodatkowo ogranicza ingerencję, eliminując konieczność prowadzenia okablowania przez ściany i sklepienia.

Kluczowe znaczenie ma odwracalność zastosowanych rozwiązań. Wszystkie instalacje powinny być możliwe do usunięcia bez pozostawienia trwałych śladów, tak aby monitoring nie naruszał autentyczności obiektu ani nie ograniczał przyszłych możliwości konserwatorskich. Dokumentowanie sposobów instalacji stanowi istotny element dokumentacji zarządzania dziedzictwem i powinno być integralną częścią rejestru prac prowadzonych w obiekcie. W tabeli 3 przedstawiono zestawienie typowych metod instalacji oraz ich przydatność w odniesieniu do chronionych obiektów sakralnych.



Ryc. 2. Schematyczne rozmieszczenie czujników w historycznym kościele (1 – czujnik temperatury i wilgotności wewnętrznej, 2 – czujnik przemieszczeń, 3 – czujnik temperatury i wilgotności zewnętrznej)

Fig. 2. Schematic sensor placement in a historic church (1 – indoor temperature and humidity sensor, 2 – displacement sensor, 3 – outdoor temperature and humidity sensor)

Installation methods in historic buildings

Sensor installation methods are generally classified as either invasive or non-invasive, although in conservation practice this distinction is not always absolute. Invasive installations involve drilling or permanent fixing within the original historic fabric and are generally avoided or strictly limited in historic churches. Such interventions may be justified only when sensors are installed in previously altered areas or when installation is carried out alongside conservation works.

Non-invasive installation methods are preferred and widely applied throughout Silesia and Upper Lusatia. These include adhesive mounting with reversible materials, mechanical clamping systems, strap-based attachment to timber elements, and placing sensors within existing recesses or on secondary surfaces. Wireless sensors further reduce intervention by eliminating the need to run cables through walls and vaults.

Reversibility is of fundamental importance. All installations should be removable without leaving permanent traces, ensuring that monitoring activities do not compromise the authenticity of the building or

Rozwiązania w zakresie transmisji danych i zasilania

Transmisja danych oraz zasilanie stanowią kluczowe elementy systemu ciągłego monitoringu w historycznych kościołach, w szczególności na obszarach wiejskich i peryferyjnych charakterystycznych dla Górnych Łużyc i części Śląska. Wiele obiektów sakralnych nie ma stałej infrastruktury elektroenergetycznej w wieżach, przestrzeniach dachowych ani na poddaszach, co ogranicza zarówno możliwości rozmieszczenia czujników, jak i długoterminowe funkcjonowanie systemów monitorujących. Z tego względu rozwiązania monitoringu powinny być projektowane w sposób zapewniający niezawodne działanie w warunkach ograniczonego dostępu do energii oraz zmiennej dostępności łączności.

Technologie komunikacji bezprzewodowej o niskim zapotrzebowaniu na energię są szczególnie dobrze dostosowane do takich warunków. Sieci szerokopasmowe niskoenergetyczne umożliwiają transmisję danych na duże odległości przy jednoczesnym ograniczeniu zużycia energii przez czujniki. Ma to szczególne znaczenie w kościołach granicznych i uciezkowych zlokalizowanych poza ośrodkami miejskimi, gdzie infrastruktura przewodowa jest niedostępna lub nieodpowiednia ze względu na wymogi ochrony zabytków. W obiektach miejskich, gdzie infrastruktura techniczna jest łatwiej dostępna, możliwe jest stosowanie bezprzewodowych sieci lokalnych lub transmisji komórkowej. Coraz częściej stosuje się rozwiązania hybrydowe, których celem jest zwiększenie redundancji systemu oraz zapewnienie ciągłości transmisji danych w sytuacji czasowych zakłóceń łączności.

Strategie zasilania powinny pozostawać zgodne z zasadami ochrony konserwatorskiej i ograniczać konieczność częstych interwencji technicznych. W historycznych kościołach powszechnie stosuje się węzły czujnikowe zasilane bateryjnie, zaprojektowane do wieloletniej pracy autonomicznej. Ich niewielkie wymagania eksploatacyjne mają szczególne znaczenie w lokalizacjach o utrudnio-

restrict future conservation interventions. Documentation of installation methods forms an important part of heritage management records and should be incorporated into the archive of works carried out within the building. Table 3 presents an overview of typical installation methods and their suitability for protected religious heritage structures.

Data transmission and power supply solutions

Data transmission and power supply are key components of continuous monitoring systems in historic churches, particularly in the rural and peripheral areas characteristic of Upper Lusatia and parts of Silesia. Many religious buildings lack permanent electrical infrastructure in towers, roof spaces, and attics, which limits both sensor placement options and the long-term operation of monitoring systems. For this reason, monitoring solutions should be designed to operate reliably under limited power access and variable communication availability.

Low-power wireless communication technologies are particularly well suited to such conditions. Low-power wide-area networks enable long-distance data transmission while keeping sensor-node energy consumption low. This is especially important in border and refuge churches located outside urban centers, where wired infrastructure is unavailable or inappropriate due to heritage protection requirements. In urban settings, where technical infrastructure is more readily available, wireless local networks or cellular communication may be employed. Hybrid solutions are increasingly adopted to improve system redundancy and ensure uninterrupted data transmission during temporary communication failures.

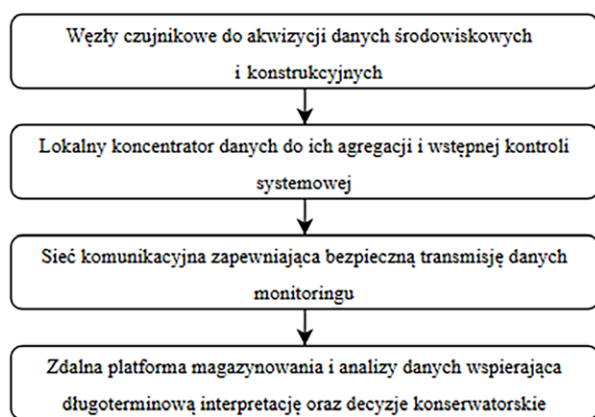
Power-supply strategies should remain consistent with conservation principles and minimize the need for frequent technical intervention. Battery-powered

Metoda instalacji	Stopień inwazyjności	Odwracalność	Typowe zastosowanie
Montaż klejowy	Niski	Wysoka	Czujniki środowiskowe na powierzchniach ścian
Mocowanie mechaniczne (zaciskowe)	Niski	Wysoka	Belki i słupy drewniane
Mocowanie opaskowe	Bardzo niski	Bardzo wysoka	Elementy konstrukcyjne z drewna
Trwałe kotwienie	Średni do wysokiego	Niska	Ograniczone przypadki realizowane podczas remontów

Tab. 3. Metody instalacji i ich przydatność w odniesieniu do konstrukcji historycznych kościołów

Installation method	Level of invasiveness	Reversibility	Typical application
Adhesive mounting	Low	High	Environmental sensors installed on wall surfaces
Mechanical clamping	Low	High	Timber beams and columns
Strap mounting	Very low	Very high	Timber structural elements
Permanent anchoring	Medium to high	Low	Limited applications carried out during renovation or conservation works

Table 3. Installation methods and their suitability for historic church structures



Ryc. 3. Schemat blokowy systemu monitoringu opartego na technologii Internetu Rzeczy dla historycznych kościołów

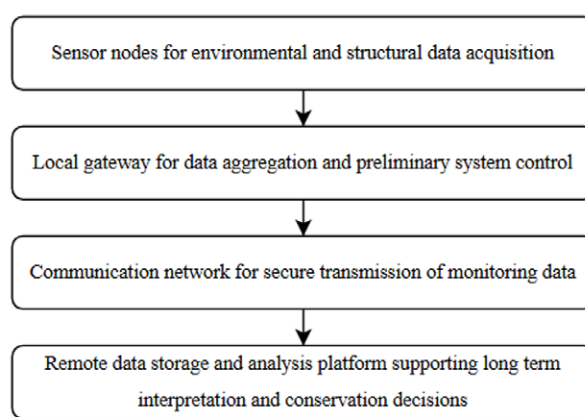


Fig. 3. Block diagram of an Internet of Things monitoring system for historic churches

nym dostępie. W wybranych lokalizacjach zewnętrznych lub dachowych niewielkie panele fotowoltaiczne mogą stanowić uzupełnienie zasilania bateryjnego, pod warunkiem, że ich montaż nie narusza walorów wizualnych ani historycznego charakteru obiektu. Wszystkie rozwiązania zasilające powinny w pierwszej kolejności uwzględniać zasadę odwracalności oraz minimalnego oddziaływania fizycznego na substancję zabytkową.

Rycina 3 przedstawia blokową strukturę systemu monitoringu opartego na technologii Internetu Rzeczy, dostosowanego do historycznych kościołów. Węzły czujnikowe gromadzą dane środowiskowe i konstrukcyjne, które są przekazywane do lokalnych koncentratorów odpowiedzialnych za ich wstępną agregację i dalszą transmisję. Za pośrednictwem odpowiedniej sieci komunikacyjnej dane trafiają do zdalnej platformy przeznaczonej do ich magazynowania i analizy. Warstwowa architektura systemu sprzyja jego skalowalności, ułatwia obsługę techniczną oraz umożliwia dostosowanie strategii monitoringu do różnych typologii kościołów i warunków lokalizacyjnych.

Podsumowując, rozwiązania w zakresie transmisji danych i zasilania stosowane w ciągłym monitoringu na obszarze Górnych Łużyc i Śląska wymagają starannego wyważenia pomiędzy niezawodnością techniczną a zasadami ochrony konserwatorskiej. Systemy te powinny funkcjonować autonomicznie przez długie okresy, a jednocześnie pozostawać dyskretnie i w pełni odwracalne. Przy spełnieniu tych warunków platformy monitoringu oparte na technologii Internetu Rzeczy dostarczają danych wysokiej jakości i stanowią solidną podstawę dalszych analiz oraz ocen predykcyjnych.

Zakończenie części 1

Przedstawione w niniejszej części uwarunkowania historyczne, typologiczne i techniczne wskazują, że skuteczny monitoring obiektów sakralnych Śląska i Górnych Łużyc wymaga rozwiązań dostosowanych zarówno do specyfiki regionalnego dziedzictwa, jak i do ograniczeń wynikających z ochrony konserwator-

sensor nodes designed for multi-year autonomous operation are commonly used in historic churches. Their low maintenance requirements are particularly valuable in difficult-to-access locations. In selected outdoor or roof-mounted applications, small photovoltaic panels may supplement battery power, provided their installation does not compromise the building's visual qualities or historic character. All power-supply solutions should prioritize reversibility and minimize physical impact on the historic fabric.

Figure 3 illustrates the block architecture of an Internet of Things monitoring system adapted for historic churches. Sensor nodes collect environmental and structural data and transmit it to local gateways responsible for preliminary aggregation and onward transmission. Through an appropriate communication network, the data are transferred to a remote platform for storage and analysis. The layered architecture enhances scalability, facilitates maintenance, and enables monitoring strategies to be adapted to different church typologies and site conditions.

In summary, data transmission and power-supply solutions applied in continuous monitoring across Upper Lusatia and Silesia require a careful balance between technical reliability and heritage conservation principles. These systems should operate autonomously over extended periods while remaining discreet and fully reversible. When these conditions are met, Internet of Things monitoring platforms provide high-quality data and establish a solid foundation for subsequent analyses and predictive assessments.

Conclusion of Part 1

The historical, typological, and technical conditions presented in this part show that effective monitoring of religious heritage buildings in Silesia and Upper Lusatia requires solutions adapted to both the specific characteristics of regional heritage and the constraints

skiej. Omówione systemy czujników, strategie instalacyjne oraz rozwiązania w zakresie transmisji danych i zasilania stanowią podstawę dalszych etapów pracy z danymi monitoringowymi.

W drugiej części artykułu przedstawiono architekturę techniczną systemów monitoringu, zasady zarządzania danymi oraz metody analityczne i predykcyjne umożliwiające przekształcanie długoterminowych obserwacji w narzędzia wspierające konserwację prewencyjną i podejmowanie decyzji w zakresie ochrony dziedzictwa.

imposed by conservation protection. The sensor systems, installation strategies, and data transmission and power-supply solutions discussed here provide the foundation for subsequent stages of work involving monitoring data.

Part 2 of the article presents the technical architecture of monitoring systems, principles of data management, and analytical and predictive methods that transform long-term observations into tools that support preventive conservation and decision-making in heritage protection.

Przypisy

- ¹ Współautorem artykułu jest również Michał Krupa, orcid.org/0000-0002-2199-0598, dr hab. inż. arch., Politechnika Krakowska, Wydział Architektury.

Footnotes

- ¹ Co-author of this article is also Michał Krupa, orcid.org/0000-0002-2199-0598, Ph.D. Eng. Arch., Cracow University of Technology, Faculty of Architecture.
-

Bibliografia/References

Opracowania / Secondary sources

- Ayyildiz Cem, Erdem H. Emre, Dirikgil Tamer, Dugenci Oguz, Kocak Taskin, Altun Fatih, Gungor V. Cagri, *Structure health monitoring using wireless sensor networks on structural elements*, „Ad Hoc Networks” 2019, t. 82.
- Boscato Giosuè, Dal Cin Alessandra, Ientile Silvia, Russo Salvatore, *Optimized procedures and strategies for the dynamic monitoring of historical structures*, „Journal of Civil Structural Health Monitoring” 2016, t. 6, nr 2.
- Deng Hao, Chen Jianhua, *A survey of structural health monitoring advances based on internet of things (IoT) sensors*, „International Journal of Advanced Computer Science and Applications” 2023, t. 14, nr 10.
- Di Trapani Fabio, Oddo Maria C., Sberna Antonio P., La Mendola Lidia, *Structural health monitoring of masonry structures using stress sensors*, „Construction and Building Materials” 2024, t. 449.
- Dolińska Noëlla, Wojciechowska Gabriela, Bednarz Łukasz, *Monitoring Environmental and Structural Parameters in Historical Masonry Buildings Using IoT LoRaWAN-Based Wireless Sensors*, „Buildings” 2025, t. 15.
- Ercan Emre, *Assessing the impact of retrofitting on structural safety in historical buildings via ambient vibration tests*, „Construction and Building Materials” 2018, t. 164.
- Gentile Carmelo, Ruccolo Antonello, Canali Francesco, *Long-term monitoring for the condition-based structural maintenance of the Milan Cathedral*, „Construction and Building Materials” 2019, t. 228.
- La Mendola Lidia, Oddo Maria C., Cucchiara Calogero, Granata Michele F., Barile Simone, Pappalardo Francesco, Pennisi Agatino, *Experimental investigation on innovative stress sensors for existing masonry structures monitoring*, „Applied Sciences” 2023, t. 13.
- Lourenço Paulo B., *Computational strategies for masonry structures*, Delft 2002.
- Mishra Mayank, Lourenço Paulo B., Ramana G.V., *Structural health monitoring of civil engineering structures by using the Internet of Things*, „Journal of Building Engineering” 2022, t. 48.
- Ramírez Javier A., Boroschek Ruben L., Aguilar Rafael, Ventura Carlos E., *Daily and seasonal effects of environmental temperature and humidity on the modal properties of structures*, „Bulletin of Earthquake Engineering” 2022, t. 20.
- Rossi Michela, Bournas Dionysios, *Structural health monitoring and management of cultural heritage structures. A state-of-the-art review*, „Applied Sciences” 2023, t. 13.
- Saravanan T. Jothi, Mishra Mayank, Aherwar Abhishek, Lourenço Paulo B., *Internet of things (IoT)-based structural health monitoring of laboratory-scale civil engineering structures*, „Innovative Infrastructure Solutions” 2024, t. 9.
- Scuro Carmelo, Lamonaca Francesco, Porzio Saverio, Milani Gabriele, Olivito Renato S., *Internet of Things (IoT) for masonry structural health monitoring (SHM)*, „Construction and Building Materials” 2021, t. 290.
- Sofi A., Regita J. Jane, Rane Bhagyes, Lau Hieng Ho, *Structural health monitoring using wireless smart sensor network - an overview*, „Mechanical Systems and Signal Processing” 2022, t. 163.
- Venanzi Ilaria, Kita Alban, Cavalagli Nicola, Ierimonti Laura, Ubertini Filippo, *Earthquake-induced damage localization in an historic masonry tower through long-term dynamic monitoring and FE model calibration*, „Bulletin of Earthquake Engineering” 2020, t. 18.

Yan Tao, Wang Zhe, Pan Zhi-Juan, *Flexible strain sensors fabricated using carbon-based nanomaterials: A review*, „Current Opinion in Solid State and Materials Science” 2018, t. 22.

Zonno Giacomo, Aguilar Rafael, Boroschek Rubén, Lourenço Paulo B., *Automated long-term dynamic monitoring using hierarchical clustering and adaptive mod-*

al tracking: validation and applications, „Journal of Civil Structural Health Monitoring” 2018, t. 8.

Teksty źródłowe / Source texts

ICOMOS, *Principles for the Analysis, Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage*, Paris 2003.

Streszczenie

Śląsk i Górne Łużyce stanowią region o wyraźnie ukształtowanej odrębności kulturowej i historycznej, uformowanej przez przemiany religijne zapoczątkowane przez reformację. Dziedzictwo architektoniczne tego obszaru obejmuje kościoły wznoszone w szczególnych uwarunkowaniach prawnych, społecznych i materiałowych, w tym kościoły graniczne, kościoły uciezkowe, miejskie kościoły murowane oraz drewniane obiekty sakralne. Wiele z tych budowli pozostaje do dziś w użytkowaniu i podlega stopniowym procesom starzenia konstrukcyjnego oraz oddziaływaniom środowiskowym, które stanowią wyzwanie dla ich zachowania.

Artykuł poświęcono zastosowaniu technologii Internetu Rzeczy (IoT) w ciągłym monitorowaniu historycznych kościołów Śląska i Górnych Łużyc. Opracowanie koncentruje się na rozwiązaniach dostosowanych do regionalnej specyfiki tych obiektów, obejmującej zastosowane materiały konstrukcyjne, warunki klimatyczne oraz wymagania konserwatorskie. Omówiono rodzaje czujników, zasady ich instalacji, metody transmisji danych oraz rozwiązania z zakresu zasilania odpowiednie dla obiektów objętych ochroną konserwatorską. Szczególną uwagę poświęcono interpretacji danych uzyskiwanych w ramach monitoringu krótko- i długoterminowego oraz metodom predykcyjnym wspierającym konserwację prewencyjną.

Przeprowadzona analiza wskazuje, że ciągły monitoring dostarcza istotnych informacji dotyczących zachowania historycznych konstrukcji kościelnych oraz przyczynia się do podejmowania świadomych decyzji w zakresie zarządzania dziedzictwem. Połączenie nowoczesnych technologii monitorowania z wiedzą o regionalnym dziedzictwie ukształtowanym przez reformację pozwala ukazać podejście łączące doświadczenie historyczne ze współczesną praktyką konserwatorską.

Abstract

Silesia and Upper Lusatia constitute a region with a distinct cultural and historical identity shaped by the religious transformations initiated during the Reformation. The area's architectural heritage includes churches built under specific legal, social, and material conditions, including border churches, refuge churches, urban masonry churches, and timber religious buildings. Many of these structures remain in use today and face progressive structural aging and environmental impacts that pose significant preservation challenges.

This article focuses on applying Internet of Things (IoT) technology to continuously monitor historic churches in Silesia and Upper Lusatia. The study concentrates on solutions adapted to the regional characteristics of these buildings, including their construction materials, climatic conditions, and conservation requirements. The study discusses different sensor types, installation principles, data transmission methods, and power-supply solutions suitable for protected heritage sites. It pays particular attention to interpreting short- and long-term monitoring data, as well as to predictive methods that support preventive conservation.

The analysis shows that continuous monitoring provides valuable information on the behavior of historic church structures and supports informed decision-making in heritage management. By combining modern monitoring technologies with knowledge of the regional heritage shaped by the Reformation, the study presents an approach that integrates historical experience with contemporary conservation practice.