

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 2: Architektura systemów, analiza danych i wsparcie konserwacji prewencyjnej

Monitoring of Religious Heritage Buildings in Silesia and Upper Lusatia Using the Internet of Things (IoT) Part 2: System Architecture, Data Analysis, and Support for Preventive Conservation

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

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

Wprowadzenie

W pierwszej części artykułu omówiono uwarunkowania historyczne i typologiczne kościołów Śląska i Górnych Łużyc oraz rozwiązania techniczne stosowane w ich ciągłym monitorowaniu z wykorzystaniem technologii Internetu Rzeczy. Przedstawiono dobór czujników, strategie instalacyjne, a także zagadnienia związane z transmisją danych i zasilaniem, które stanowią podstawę funkcjonowania systemów monitorujących w obiektach objętych ochroną konserwatorską.

W niniejszej części skoncentrowano się na zagadnieniach związanych z dalszym przetwarzaniem i wykorzystaniem danych z monitoringu. Przedstawiono architekturę techniczną systemów dostosowaną do regionalnych ograniczeń, zasady zarządzania danymi oraz schematy analityczne umożliwiające interpretację obserwacji krót-

Introduction

The first part of this article discussed the historical and typological characteristics of churches in Silesia and Upper Lusatia, as well as the technical solutions used for their continuous monitoring through Internet of Things technology. It presented sensor selection, installation strategies, and issues related to data transmission and power supply that form the foundation of monitoring systems applied in heritage-protected buildings.

This second part focuses on the subsequent processing and utilization of monitoring data. It presents a technical system architecture adapted to regional constraints, data management principles, and analytical frameworks that enable the interpretation of both short-term and long-term observations. Particular at-

* 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 2: System Architecture, Data Analysis, and Support for Preventive Conservation. *Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation* 2026, 86S:274–291

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

doi: 10.48234/WK86SHERITAGE

Praca dopuszczona do druku po recenzjach

Article accepted for publishing after reviews

ko- i długoterminowych. Szczególną uwagę poświęcono metodom predykcyjnym, które pozwalają przekształcać zarejestrowane dane w narzędzia wspierające konserwację prewencyjną oraz podejmowanie decyzji dotyczących ochrony dziedzictwa obiektów sakralnych.

Architektura techniczna i zarządzanie danymi w ciągłym monitoringu

Skuteczność ciągłego monitoringu w historycznych kościołach zależy od decyzji technicznych, które z jednej strony uwzględniają ograniczenia wynikające z ochrony konserwatorskiej, z drugiej zaś odpowiadają na regionalne uwarunkowania Górnych Łużyc i Śląska. Architektura systemów musi funkcjonować w obiektach ogrzewanych okresowo i o ograniczonym dostępie do zasilania, w wieżach oraz przestrzeniach dachowych o ograniczonej łączności, a także na obszarach wiejskich, gdzie konieczna jest transmisja danych na duże odległości. Zarządzanie danymi powinno zapewniać niezawodną akwizycję, weryfikację, magazynowanie oraz analizę informacji w perspektywie wielu sezonów. W rozdziale przedstawiono praktyczną architekturę systemu, cykl życia danych uwzględniający kontrolę jakości i metadane, schemat analityczny pozwalający na rozróżnienie zdarzeń krótkoterminowych od trendów długoterminowych, a także zarys zagadnień związanych z bezpieczeństwem i zasadami zarządzania dostosowanymi do obiektów objętych ochroną konserwatorską. Zaprezentowane podejście opiera się na doświadczeniach z długookresowego monitoringu obiektów zabytkowych oraz na najnowszych osiągnięciach w zakresie monitoringu stanu technicznego konstrukcji z wykorzystaniem technologii Internetu Rzeczy [Ercan 2018; Rossi, Bournas 2023; Scuro et al. 2021; Forlesi et al. 2024; Mishra et al. 2022].

Architektura systemu dostosowana do ograniczeń regionalnych

Architektura systemu na obszarze Górnych Łużyc i Śląska musi uwzględniać obecność wysokich, muryowanych wież, grubych murów charakteryzujących się gradientami wilgotności oraz konstrukcji drewnianych, które szybko reagują na zmiany wilgotności powietrza. Węzły czujnikowe rejestrują sygnały środowiskowe i konstrukcyjne, a następnie przekazują je do lokalnego koncentratora. Koncentrator realizuje wstępną kontrolę danych i przekazuje je dalej do bezpiecznego repozytorium przeznaczonego do ich analizy. W lokalizacjach wiejskich, typowych dla kościołów granicznych i ucieczkowych, często konieczne jest zastosowanie niskoenergetycznych sieci szerokopasmowych. Technologia LoRaWAN jest w tym kontekście szczególnie użyteczna ze względu na duży zasięg i niskie zużycie energii. W środowiskach miejskich możliwe jest natomiast stosowanie kombinacji sieci lokalnych i transmisji komórkowej w celu zwiększenia redundancji komunikacji. Architektura systemu wymaga również

attention is devoted to predictive methods that transform recorded data into tools supporting preventive conservation and decision-making related to the protection of religious heritage buildings.

System architecture and data management in continuous monitoring

The effectiveness of continuous monitoring in historic churches depends on technical decisions that must respect conservation requirements while responding to the regional conditions of Upper Lusatia and Silesia. System architecture must operate in buildings that are heated only periodically, have limited access to power supply, include towers and roof spaces with constrained connectivity, and are frequently located in rural areas where long-distance data transmission is required. Data management should ensure reliable acquisition, validation, storage, and analysis across multiple seasons. This section presents a practical system architecture, a data lifecycle incorporating quality control and metadata, an analytical framework for distinguishing short-term events from long-term trends, and an outline of security and governance issues adapted to heritage-protected sites. The proposed approach draws on experience from long-term monitoring of heritage structures and recent developments in structural health monitoring using Internet of Things technologies [Ercan 2018; Rossi, Bournas 2023; Scuro et al. 2021; Forlesi et al. 2024; Mishra et al. 2022].

System architecture adapted to regional constraints

The system architecture implemented in Upper Lusatia and Silesia must account for tall masonry towers, thick walls with moisture gradients, and timber structures that respond quickly to changes in air humidity. Sensor nodes record environmental and structural signals and subsequently transmit them to a local gateway. The gateway performs preliminary data verification and forwards the information to a secure repository intended for further analysis. In rural locations, which are typical of border and refuge churches, the use of low-power wide-area networks is often necessary. LoRaWAN is particularly useful in this context because of its long communication range and low energy consumption. In urban environments, combinations of local wireless networks and cellular transmission can increase communication redundancy. System architecture also requires reliable time synchronization, which is essential for modal analyses of towers and for correlating microclimatic data with structural response in buildings of mixed construction [Ayyildiz et al. 2019; Abruzzese et al. 2020; Dolińska et al. 2025b].

The system architecture should include sensor nodes incorporating measurement modules, pow-

niezawodnej synchronizacji czasowej, niezbędnej do prowadzenia analiz modalnych wież oraz korelacji danych mikroklimatycznych z odpowiedzią konstrukcyjną w obiektach o konstrukcji mieszanej [Ayyildiz et al. 2019; Abruzzese et al. 2020; Dolińska et al. 2025b].

Architektura systemu powinna obejmować węzły czujnikowe zawierające moduły pomiarowe, zarządzania zasilaniem, lokalnego przetwarzania danych oraz komunikacji radiowej. Niezbędnym elementem są również koncentratory danych, umożliwiające agregację informacji pochodzących z różnych stref obiektu, takich jak nawa, wieża czy przestrzeń dachowa. Warstwa danych powinna zapewniać bezpieczne magazynowanie informacji, z zachowaniem wersjonowania zapisów oraz powiązań z metadanymi opisującymi typ czujnika, jego lokalizację, datę kalibracji oraz kontekst konserwatorski. Warstwa analityczna z kolei udostępnia narzędzia do wizualizacji danych, estymacji trendów oraz modelowania predykcyjnego, dostosowane do potrzeb ochrony zabytków [Almohsen 2024; Forlesi et al. 2024; Rossi, Bournas 2023; Dolińska et al. 2025a].

Cykl życia danych, kontrola jakości i metadane

Jasno zdefiniowany cykl życia danych zapewnia zachowanie ich wiarygodności od momentu akwizycji aż do etapu interpretacji. Cykl ten obejmuje etapy akwizycji, walidacji, magazynowania, przetwarzania, interpretacji oraz archiwizacji. Na etapie akwizycji wymagane jest rejestrowanie obowiązkowych pól, takich jak identyfikator czujnika, jednostki pomiarowe po kalibracji, interwał próbkowania oraz kod lokalizacji powiązany z dokumentacją rysunkową. Wstępna walidacja obejmuje sprawdzenie zakresów wartości, wykrywanie brakujących danych oraz kontrolę ciągłości czasowej zapisów. Magazynowanie danych opiera się na strukturze umożliwiającej równoległe przechowywanie surowych danych oraz przetworzonych szeregów czasowych, co pozwala na ich późniejszą ponowną analizę. Przetwarzanie obejmuje filtrację dostosowaną do rodzaju czujnika i mierzonego parametru, a także oznaczanie zdarzeń, takich jak nabożeństwa, praca dzwonów czy wyjątkowe warunki pogodowe. Interpretacja łączy analizę szeregów czasowych z informacjami dotyczącymi sposobu użytkowania obiektu oraz z dokumentacją konserwatorską. Archiwizacja zapewnia długoterminowe zabezpieczenie danych i umożliwia prowadzenie analiz porównawczych pomiędzy sezonami oraz różnymi obiektami [Ercan 2018; Scuro et al. 2021].

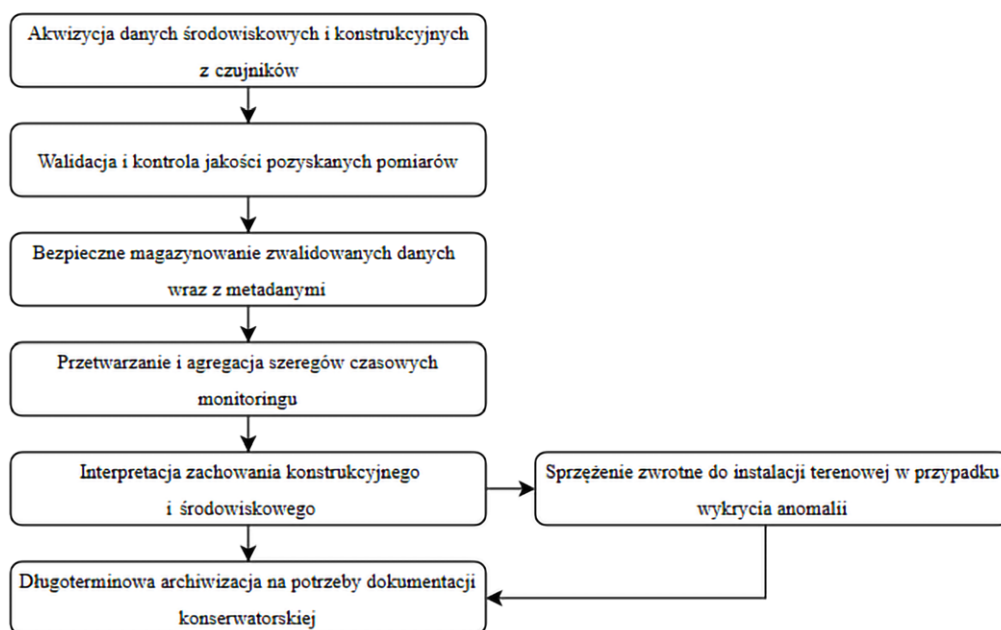
Metadane mają zasadnicze znaczenie w odniesieniu do obiektów objętych ochroną zabytków, ponieważ lokalizacja czujników, sposób ich instalacji oraz stopień odwracalności wpływają na interpretację wyników pomiarów. Każdy rekord powinien zawierać informacje dotyczące typologii kościoła, materiału monitorowanego elementu, rodzaju instalacji, ograniczeń widoczności oraz wszelkich istotnych uwag konserwatorskich. W wypadku wież i sklepień metadane powinny obejmować wysokość instalacji oraz jej położenie względem nieciągłości

er-management units, local data-processing functions, and radio communication components. Data gateways are also essential, enabling the aggregation of information originating from different zones of a building, such as the nave, tower, or roof space. The data layer should provide secure information storage while maintaining version control and links to meta-data describing the sensor type, installation location, calibration date, and conservation context. The analytical layer, in turn, provides tools for data visualization, trend estimation, and predictive modeling adapted to heritage conservation needs [Almohsen 2024; Forlesi et al. 2024; Rossi, Bournas 2023; Dolińska et al. 2025a].

Data lifecycle, quality control, and metadata

A clearly defined data lifecycle ensures reliable information from acquisition through interpretation. This lifecycle includes acquisition, validation, storage, processing, interpretation, and archiving. During data acquisition, record mandatory fields, including the sensor identifier, measurement units after calibration, sampling interval, and location code linked to the relevant documentation drawings. Initial validation includes range checking, missing-data detection, and verification of temporal continuity. Data storage should use a structure that preserves both raw data and processed time series in parallel, enabling future reanalysis. Data processing includes filtering procedures adapted to sensor type and measured parameter, as well as event tagging for occurrences such as church services, bell ringing, or exceptional weather conditions. Interpretation combines time-series analysis with information on building use and conservation documentation. Archiving ensures long-term data preservation and enables comparative analyses across seasons and heritage assets [Ercan 2018; Scuro et al. 2021].

Metadata are of critical importance for heritage-protected buildings because sensor location, installation method, and degree of reversibility directly influence the interpretation of measurement results. Each record should include information on church typology, the material of the monitored element, installation type, visibility constraints, and any relevant conservation notes. For towers and vaults, metadata should include installation height and position relative to structural discontinuities. For timber churches, record the timber species, where known, as well as the distance from potential moisture sources such as exterior walls or ground surfaces. Such detail enables responsible interpretation of monitoring results and supports reproducible findings in accordance with conservation practice principles [Rossi, Bournas 2023; Dolińska et al. 2025b]. Figure 4 illustrates the data lifecycle framework, highlighting validation stages and feedback loops directed to field teams when system errors or signal drift are detected.



Ryc. 4. Schemat cyklu życia danych w monitoringu obiektów sakralnych; wszystkie ryciny i tabele opracowane przez autorów

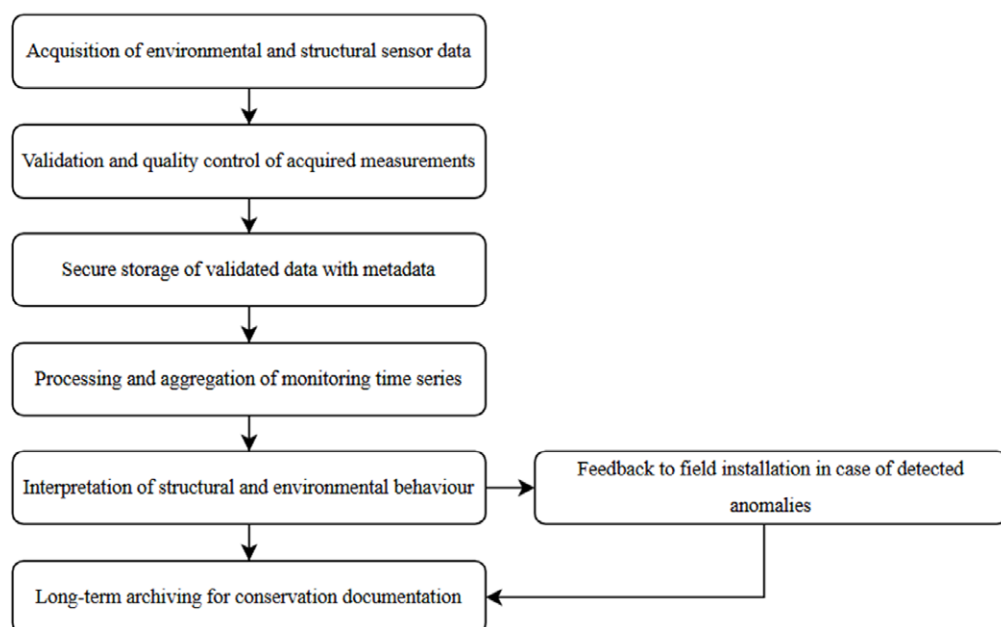


Fig. 4. Data lifecycle framework for the monitoring of religious heritage buildings; all figures and tables were prepared by the authors

konstrukcyjnych. Dla kościołów drewnianych zaleca się odnotowanie gatunku drewna, o ile jest on znany, oraz odległości od potencjalnych źródeł wilgoci, takich jak ściany zewnętrzne czy grunt. Tak szczegółowe informacje umożliwiają odpowiedzialną interpretację danych oraz zapewniają powtarzalność wyników zgodnie z zasadami praktyki konserwatorskiej [Rossi, Bournas 2023; Dolińska et al. 2025b]. Rycina 4 przedstawia schemat cyklu życia danych, podkreślając etapy walidacji oraz pętle sprzężenia zwrotnego kierowane do zespołów terenowych w sytuacji wykrycia błędów systemowych lub dryfu sygnału.

Tabela 5 przedstawia zalecane interwały próbkowania, okresy retencji danych oraz minimalne procedury

Table 5 presents recommended sampling intervals, data-retention periods, and minimum validation procedures for representative church typologies in Upper Lusatia and Silesia. The summary accounts for regional patterns of use, including intermittent heating, as well as event-related loads in towers and lightweight timber structures.

Analytical Framework for the interpretation of short-term and long-term monitoring data

An analytical diagram should make it possible to distinguish short-term events from processes. The ana-

walidacyjne dla reprezentatywnych typologii kościołów na Górnych Łużycach i Śląsku. Zestawienie uwzględnia regionalne uwarunkowania użytkowania obiektów, takie jak ogrzewanie okresowe, a także obciążenia zdarzeniowe występujące w wieżach i lekkich konstrukcjach drewnianych.

Schemat analityczny interpretacji danych krótko- i długoterminowych

Schemat analityczny powinien umożliwiać rozdzielnie zdarzeń krótkotrwałych od procesów zachodzących powoli oraz uwzględniać silny wpływ środowiska na odpowiedź konstrukcyjną obiektu. W wypadku wież oraz konstrukcji o dużych rozpiętościach dobowe i sezonowe zmiany temperatury oraz wilgotności wpływają na parametry modalne konstrukcji. Przed przypisaniem zaobserwowanych zmian uszkodzeniom konieczne jest

lytical framework should distinguish short-term events from slowly evolving processes while accounting for the strong influence of environmental conditions on a building’s structural response. For towers and long-span structures, daily and seasonal variations in temperature and humidity affect the structure’s modal properties. Before attributing observed changes to damage, environmental normalization must be performed. Commonly applied methods include regression analysis with respect to temperature and humidity, clustering of similar environmental states, and adaptive tracking of modal parameters. These approaches make it possible to isolate residual changes that are more likely to be associated with the evolution of structural condition [Ramírez et al. 2022; Zonno et al. 2018].

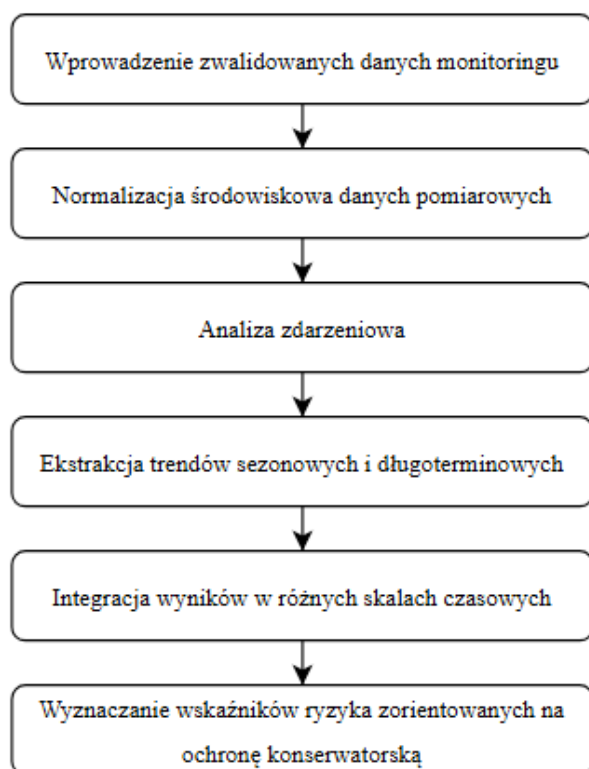
In timber churches, rapid material responses predominate. Analyze timber moisture content and structural-element deformations in both event-based

Typologia obiektu	Kluczowe parametry	Typowy interwał próbkowania	Retencja danych i przegląd	Minimalne procedury walidacyjne
Miejski kościół murowany z wieżą	Szerokość rys, przechył, drgania, RH i temperatura	Rysy i przechył co 5–10 min; drgania 100–200 Hz podczas zdarzeń; RH i temperatura co 5 min	Przegląd sezonowy z analizą roczną	Kontrola zakresów i dryfu, kontrola dryfu zegara, oznaczanie zdarzeń związanych z pracą dzwonów
Wiejski kościół murowany	Wilgotność murów, RH i temperatura, przemieszczenia	Wilgotność i RH co 10 min; przemieszczenia co 10–30 min	Przegląd sezonowy z naciskiem na okres zimowy	Wykrywanie nasycenia czujników, kontrola stanu baterii, identyfikacja długotrwałych luk w danych
Kościół graniczny lub ucieczkowy w środowisku wiejskim	Szerokość rys, przechył, RH i temperatura, drgania zdarzeniowe	Rysy i przechył co 10 min; drgania zdarzeniowe 100 Hz; RH i temperatura co 10 min	Przegląd sezonowy z analizą zdarzeń wiatrowych	Kontrola jakości łącza, monitorowanie utraty pakietów, eliminacja wartości odstających
Kościół drewniany lub o konstrukcji ryglowej	Wilgotność drewna, odkształcenia, przemieszczenia lokalne, RH i temperatura	Wilgotność i odkształcenia co 1–5 min; RH i temperatura co 5 min	Przegląd miesięczny z syntezą sezonową	Wykrywanie skoków wilgotności, analiza zależności od temperatury, ocena ryzyka odspojenia czujników

Tab. 5. Zalecane interwały próbkowania, okresy retencji danych oraz podstawowe procedury kontroli jakości dla regionalnych typologii kościołów (RH oznacza wilgotność względną)

Building typology	Key parameters	Typical sampling interval	Data retention and review	Minimum validation procedures
Urban masonry church with a tower	Crack width, tilt, vibration, RH and temperature	Crack width and tilt every 5–10 min; vibration at 100–200 Hz during events; RH and temperature every 5 min	Seasonal review with annual analysis	Range and drift verification, clock-drift control, event tagging for bell operation
Rural masonry church	Wall moisture content, RH and temperature, displacements	Moisture content and RH every 10 min; displacements every 10–30 min	Seasonal review with emphasis on the winter period	Detection of sensor saturation, battery-status verification, identification of long-term data gaps
Border or refuge church in a rural environment	Crack width, tilt, RH and temperature, event-related vibrations	Crack width and tilt every 10 min; event-related vibrations at 100 Hz; RH and temperature every 10 min	Seasonal review with analysis of wind-related events	Link-quality verification, packet-loss monitoring, outlier removal
Timber or timber-frame church	Timber moisture content, strain, local displacements, RH and temperature	Moisture content and strain every 1–5 min; RH and temperature every 5 min	Monthly review with seasonal synthesis	Detection of moisture spikes, temperature-dependence analysis, assessment of sensor-detachment risk

Table 5. Recommended Sampling Intervals, Data Retention Periods, and Minimum Quality Control Procedures for Regional Church Typologies (RH = Relative Humidity)



Ryc. 5. Schemat analityczny monitoringu kościołów

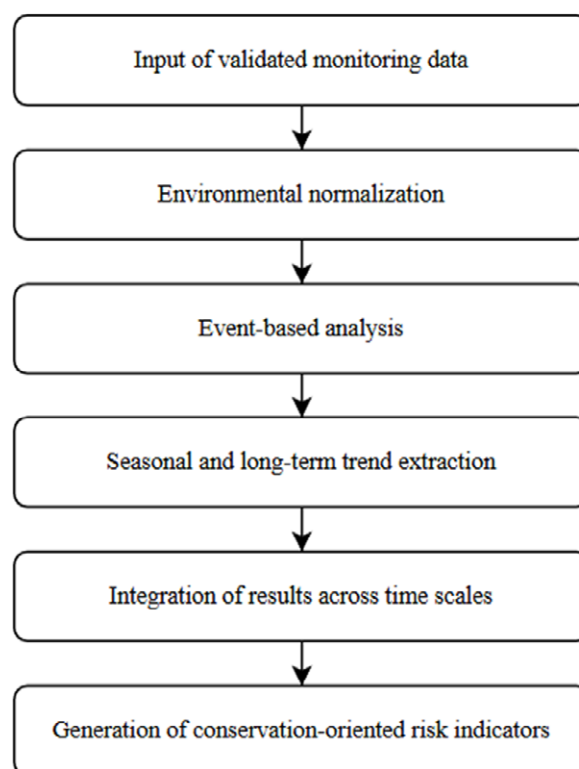


Fig. 5. Analytical framework for church monitoring

przeprowadzenie normalizacji środowiskowej. Stosowane metody obejmują regresję względem temperatury i wilgotności, grupowanie podobnych stanów środowiskowych oraz adaptacyjne śledzenie parametrów modalnych. Podejścia te pozwalają na wyodrębnienie zmian resztkowych, które z większym prawdopodobieństwem są związane z ewolucją stanu konstrukcji [Ramírez et al. 2022; Zonno et al. 2018].

W kościołach drewnianych dominują szybkie reakcje materiałowe. Zawartość wilgoci w drewnie oraz odkształcenia elementów konstrukcyjnych powinny być analizowane zarówno w oknach zdarzeniowych obejmujących nabożeństwa i gwałtowne zmiany warunków wentylacji, jak i na podstawie uśrednień tygodniowych oraz sezonowych, ujawniających powolne trendy długoterminowe. W wypadku murów transport wilgoci wymaga analizy opartej na dłuższych szeregach czasowych. Pomiar wilgotności powierzchniowej i głębokiej murów zyskują znaczenie interpretacyjne dopiero w powiązaniu z warunkami klimatycznymi na zewnątrz oraz harmonogramami ogrzewania. Dla wszystkich typów obiektów schemat analityczny zyskuje na wartości dzięki łącznemu zestawieniu danych mikroklimatycznych i wskaźników mechanicznych, co umożliwia wnioskowanie o relacjach przyczynowo-wynikowych w kontekście konserwatorskim [Rossi, Bournas 2023; Scuro et al. 2021].

Rycina 5 ilustruje schemat analityczny stosowany w monitoringu kościołów. Proces rozpoczyna się od synchronizacji szeregów danych środowiskowych i konstrukcyjnych, a następnie obejmuje filtrację jako-

windows that include church services and sudden ventilation changes, and in weekly and seasonal averages that reveal gradual long-term trends. In masonry structures, moisture transport requires analysis based on longer time series. Surface and internal wall moisture measurements gain interpretative significance only when considered alongside external climatic conditions and heating schedules. For all building types, the analytical framework adds value by combining microclimatic data with mechanical indicators, enabling inference of cause-and-effect relationships relevant to conservation practice [Rossi, Bournas 2023; Scuro et al. 2021].

Figure 5 illustrates the analytical framework applied in church monitoring. The process begins by synchronizing environmental and structural datasets, then includes quality filtering, environmental normalization, and selection of appropriate temporal scales. The next stage divides analyses into pathways addressing events associated with bell operation and church services, and extracts seasonal trends related to deformation and moisture. The process concludes with determining risk indicators and formulating conservation recommendations, such as minor adjustments to heating strategies or targeted technical inspections [Ercan 2018; Forlesi et al. 2024].

Security, ethics, and governance principles in protected heritage buildings

Monitoring systems operate in churches that function simultaneously as heritage assets and active places of

ściową, normalizację środowiskową oraz dobór odpowiednich skal czasowych. Kolejnym etapem jest rozgałęzienie analiz na ścieżki obejmujące analizę zdarzeń związanych z pracą dzwonów i nabożeństwami oraz ekstrakcję trendów sezonowych dotyczących deformacji i wilgotności. Proces kończy się wyznaczeniem wskaźników ryzyka oraz sformułowaniem zaleceń konserwatorskich, takich jak niewielkie korekty strategii ogrzewania lub ukierunkowane inspekcje techniczne [Ercan 2018; Forlesi et al. 2024].

Bezpieczeństwo, etyka i zasady zarządzania w obiektach objętych ochroną

Systemy monitoringu funkcjonują w kościołach, które są jednocześnie zabytkami oraz czynnymi przestrzeniami kultu religijnego. Środki bezpieczeństwa muszą zapewniać integralność danych przy jednoczesnym poszanowaniu zasad prywatności. Transmisja danych powinna wykorzystywać mechanizmy szyfrowania adekwatne do zastosowanej warstwy sieciowej. Dostęp do danych surowych i przetworzonych powinien być oparty na przypisanych rolach, z uprawnieniami do odczytu dla partnerów projektu oraz ograniczonymi prawami zapisu dla administratorów danych. Dla koncentratorów zlokalizowanych na obszarach wiejskich i zasilanych autonomicznie należy uwzględnić zabezpieczenia fizyczne zapobiegające nieuprawnionej ingerencji. Zasady zarządzania systemem powinny pozostawać zgodne z przepisami dotyczącymi ochrony zabytków oraz z potrzebami parafii, obejmując jasne procedury konserwacji czujników i dokumentowania ich czasowego demontażu podczas wydarzeń liturgicznych [Scuro et al. 2021; Rossi, Bournas 2023].

Praktyka etyczna wymaga transparentności wobec interesariuszy w zakresie prowadzonych pomiarów oraz celów ich realizacji, a także zapewnienia, że monitoring nie zakłóca przebiegu liturgii ani nie narusza integralności wizualnej wnętrza. Dokumentacja systemu powinna być archiwizowana wraz z dokumentacją obiektu, tak aby przyszłe zespoły konserwatorskie miały pełną wiedzę na temat zastosowanych rozwiązań oraz sposobu, w jaki dane wspierały procesy decyzyjne. Takie podejście sprzyja budowaniu zaufania i zapewnienia, że ciągły monitoring służy nadrzędnemu celowi, jakim jest konserwacja prewencyjna, zamiast stawać się celem samym w sobie [Ercan 2018; Kampli et al. 2023; Dolińska et al. 2025b].

Podsumowując, solidna architektura systemu, zdyscyplinowany cykl życia danych, analizy pozwalające na rozdzielenie wpływów środowiskowych od zmian konstrukcyjnych oraz odpowiednie zasady zarządzania sprawiają, że ciągły monitoring staje się praktycznym narzędziem ochrony kościołów Górnych Łużyc i Śląska. Kolejny rozdział poświęcony jest metodom predykcyjnym, które umożliwiają przekształcanie stabilnych szeregów danych z monitoringu w systemy wczesnego ostrzegania oraz narzędzia wspomagające podejmowanie decyzji konserwatorskich.

worship. Security measures must ensure data integrity while respecting privacy requirements. Data transmission should employ encryption mechanisms appropriate to the communication layer used. Access to raw and processed data should be role-based, with read permissions for project partners and restricted write permissions for data administrators. For gateways in rural areas powered autonomously, implement physical safeguards to prevent unauthorized interference. Governance principles should remain consistent with heritage-protection regulations and the needs of parish communities, including clear procedures for sensor maintenance and documentation of temporary sensor removal during liturgical events [Scuro et al. 2021; Rossi, Bournas 2023].

Ethical practice requires transparency towards stakeholders regarding both the measurements being conducted and the purposes for which they are undertaken. Monitoring activities should not interfere with religious practices or compromise the visual integrity of church interiors. System documentation should be archived with the building documentation so future conservation teams have complete information on the implemented solutions and how monitoring data supported decision-making. Such an approach fosters trust and ensures that continuous monitoring serves the overarching objective of preventive conservation rather than becoming an end in itself [Ercan 2018; Kampli et al. 2023; Dolińska et al. 2025b].

In summary, a robust system architecture, a disciplined data lifecycle, analytical procedures that separate environmental influences from structural changes, and appropriate governance principles transform continuous monitoring into a practical tool for protecting churches in Upper Lusatia and Silesia. The following section focuses on predictive methods that turn stable monitoring datasets into early warning systems and decision-support tools for heritage conservation.

Predictive methods and interpretation of monitoring data for preventive conservation

Predictive analysis represents the stage at which data acquired through continuous monitoring become directly useful in heritage conservation decision-making. For the historic churches of Silesia and Upper Lusatia, prediction is not intended to provide precise quantitative forecasts in the engineering sense, but to enable early identification of adverse trends and conditions associated with increased risk. Predictive methods must therefore be transparent, explainable, and consistent with the precautionary approach to heritage conservation [Dolińska et al. 2025a]. This section presents predictive approaches suitable for masonry, timber, and mixed-construction churches typical of the region and discusses how they support preventive rather than reactive conservation.

Analiza predykcyjna stanowi etap, na którym dane pozyskiwane w ramach ciągłego monitoringu stają się bezpośrednio użyteczne w procesie podejmowania decyzji dotyczących ochrony dziedzictwa. W odniesieniu do historycznych kościołów Śląska i Górnych Łużyc predykcja nie zmierza do precyzyjnego prognozowania ilościowego w sensie inżynierskim, lecz do wczesnej identyfikacji niekorzystnych trendów oraz warunków zwiększonego ryzyka. Metody predykcyjne muszą być zatem transparentne, możliwe do wyjaśnienia oraz zgodne z ostrożnościowym podejściem do ochrony zabytków [Dolińska et al. 2025a]. W niniejszym rozdziale przedstawiono podejścia predykcyjne odpowiednie dla kościołów murowanych, drewnianych oraz o konstrukcji mieszanej, typowych dla regionu, a także omówiono sposób, w jaki wspierają one konserwację prewencyjną, a nie działania reaktywne.

Pojęcie predykcji w monitoringu dziedzictwa

W kontekście ochrony historycznych kościołów predykcję należy rozumieć jako interpretację danych monitoringu w celu przewidywania przyszłego zachowania obiektu w podobnych warunkach. Budowle ukształtowane w epoce reformacji reagują na oddziaływanie środowiskowe i konstrukcyjne w sposób powolny i kumulatywny. Modele predykcyjne pozwalają ocenić, czy obserwowane zmiany mieszczą się w zakresie oczekiwanego zachowania sezonowego, czy też wskazują na postępującą degradację. Rozróżnienie to ma kluczowe znaczenie na Śląsku i Górnych Łużycach, gdzie kościoły są często ogrzewane okresowo i narażone na znaczne roczne wahania wilgotności.

Predykcja w monitoringu dziedzictwa ma zatem charakter ukierunkowany na ryzyko, a nie na awarię. Jej celem jest wczesne sygnalizowanie wzrostu prawdopodobieństwa wystąpienia uszkodzeń, takich jak poszerzanie się rys, nadmierna wilgotność drewna czy narastający przechył wieży, na tyle wcześnie, aby możliwe było zastosowanie działań o niewielkim stopniu ingerencji. Mogą one obejmować korekty mikroklimatu, planowanie inspekcji lub drobne prace utrzymaniowe zamiast interwencji awaryjnych.

Analiza trendów i metody progowe

Analiza trendów jest najbardziej rozpowszechnionym i akceptowanym podejściem predykcyjnym w monitoringu obiektów zabytkowych. Opiera się na obserwacji monitorowanych parametrów w długim horyzoncie czasowym oraz identyfikacji stopniowych zmian w bazowym zachowaniu konstrukcji. Modele liniowe oraz modele o przebiegu odcinkowo-liniowym są szczególnie użyteczne w odniesieniu do takich parametrów, jak szerokość rys, przemieszczenia czy przechyły wież w kościołach murowanych. Pozwalają one konserwato-

In the context of protecting historic churches, prediction should be understood as interpreting monitoring data to anticipate a building's future behavior under similar conditions. Structures shaped during the Reformation period respond to environmental and structural influences gradually and cumulatively. Predictive models make it possible to assess whether observed changes fall within the range of expected seasonal behavior or indicate progressive deterioration. This distinction is particularly important in Silesia and Upper Lusatia, where churches are often heated intermittently and face significant annual humidity fluctuations.

Prediction in heritage monitoring is therefore risk-oriented rather than failure-oriented. Its purpose is to provide early warning of an increased probability of damage, such as widening cracks, excessive timber moisture content, or increasing tower inclination, at a sufficiently early stage to allow low-intervention measures. Such measures may include microclimate adjustments, planning targeted inspections, or undertaking minor maintenance works instead of emergency interventions.

Trend analysis and threshold-based methods

Trend analysis is the most widely used and accepted predictive approach for monitoring heritage buildings. It is based on observing monitored parameters over extended periods and identifying gradual changes in a structure's baseline behavior. Linear models and piecewise-linear models are particularly useful for parameters such as crack width, displacement, and tower inclination in masonry churches. They allow conservation professionals to assess whether deformations are progressing steadily, stabilizing, or accelerating.

Threshold-based methods are frequently applied alongside trend analysis. Thresholds are not universal limit values; they are defined contextually in cooperation with heritage authorities, based on historical documentation, material properties, and observed building behavior. For example, persistently elevated timber moisture content in a wooden church that exceeds an established threshold may be treated as a warning signal even when no visible damage is present. Similarly, repeated exceedance of relative humidity thresholds in unheated masonry churches may indicate a future risk of condensation and surface deterioration. Figure 6 illustrates long-term trend extraction combined with warning thresholds, using crack-width monitoring in a church wall as an example.

These methods are particularly well suited to the conservation context of Silesia and Upper Lusatia because they are transparent and easy to explain to non-technical stakeholders, including parish administrators and heritage protection officials.

rom ocenić, czy deformacje postępują w sposób stabilny, ulegają zahamowaniu, czy też wykazują tendencję do przyspieszenia.

Metody progowe są często stosowane równolegle z analizą trendów. Progi nie stanowią uniwersalnych wartości granicznych, lecz są definiowane kontekstowo we współpracy z organami ochrony zabytków, w oparciu o dokumentację historyczną, właściwości materiałowe oraz obserwowane zachowanie obiektu. Przykładowo, utrzymująca się przez dłuższy czas podwyższona wilgotność drewna w kościołach drewnianych, przekraczająca ustalony poziom, może być traktowana jako sygnał ostrzegawczy, nawet jeżeli nie występują jeszcze widoczne uszkodzenia. Podobnie powtarzające się przekroczenia progów wilgotności względnej w nieogrzewanych kościołach murowanych mogą wskazywać na ryzyko kondensacji i wystąpienie uszkodzeń powierzchni w przyszłości. Rycina 6 ilustruje koncepcję ekstrakcji trendu długoterminowego w połączeniu z progami ostrzegawczymi na przykładzie monitoringu szerokości rys w murze kościoła.

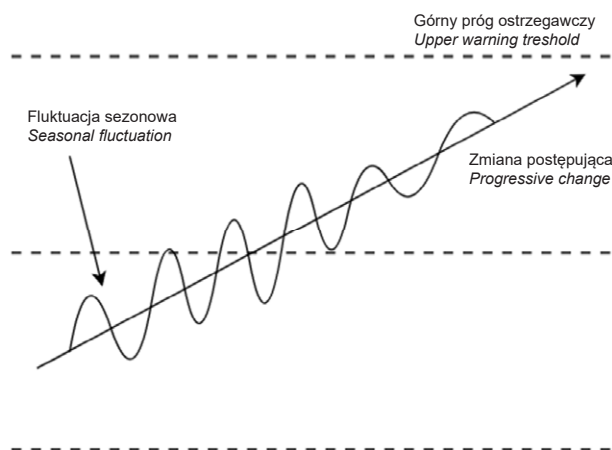
Metody te są szczególnie dobrze dopasowane do kontekstu konserwatorskiego Śląska i Górnych Łużyc, ponieważ cechują się przejrzystością i mogą być łatwo wyjaśniane interesariuszom bez przygotowania technicznego, w tym administratorom parafialnym oraz urzędnikom odpowiedzialnym za ochronę zabytków.

Prognozowanie i predykcja szeregów czasowych

Metody prognozowania szeregów czasowych stanowią rozszerzenie analizy trendów poprzez uwzględnienie wzorców czasowych, takich jak sezonowość i autokorelacja. Modele średnich kroczących oraz metody dekompozycji sezonowej są powszechnie stosowane do rozdzielenia krótkotrwałych fluktuacji od tendencji długoterminowych. W kontekście kościołów podejścia te okazują się szczególnie użyteczne w analizie parametrów środowiskowych, takich jak temperatura i wilgotność względna.

Przykładowo, dekompozycja danych dotyczących wilgotności względnej na składowe sezonowe i resztkowe umożliwia prognozowanie okresów podwyższonego ryzyka wilgotnościowego w kościołach drewnianych lub w strefach konstrukcji mieszanych, w których współistnieją elementy drewniane i murowane. Prognozy krótkoterminowe wspierają działania proaktywne, takie jak czasowe dostosowanie wentylacji lub odpowiednie planowanie prac utrzymaniowych.

Metody prognostyczne muszą być jednak stosowane z ostrożnością w kontekście ochrony dziedzictwa. Prognozy są obarczone niepewnością, zwłaszcza w sytuacjach zmiany sposobu użytkowania obiektu lub warunków klimatycznych. Z tego względu ich wyniki należy interpretować raczej jako scenariusze niż jako precyzyjne przewidywania. Ich podstawową wartością jest wspieranie planowania i przygotowania odpowiednich działań, a nie zastępowanie oceny eksperckiej.



Ryc. 6. Przykład ekstrakcji trendu długoterminowego z progami ostrzegawczymi w monitoringu szerokości rys w murze kościoła, ukazujący rozróżnienie pomiędzy fluktuacją sezonową a zmianą postępującą

Fig. 6. Example of long-term trend extraction with warning thresholds in masonry crack-width monitoring, illustrating the distinction between seasonal fluctuation and progressive change

Time-series forecasting and prediction

Time-series forecasting methods extend trend analysis by incorporating temporal patterns such as seasonality and autocorrelation. Moving-average models and seasonal decomposition methods commonly distinguish short-term fluctuations from long-term tendencies. In the context of churches, these approaches are particularly useful for analyzing environmental parameters such as temperature and relative humidity.

For example, decomposing relative humidity data into seasonal and residual components makes it possible to predict periods of increased moisture-related risk in timber churches or in mixed-construction zones where timber and masonry elements coexist. Short-term forecasts support proactive measures such as temporary adjustments to ventilation strategies or the appropriate scheduling of maintenance activities.

Forecasting methods must, however, be applied with caution in heritage conservation. Forecasts are inherently uncertain, particularly when building use patterns or climatic conditions change. Consequently, interpret their results as scenarios rather than precise predictions. Their principal value lies in supporting planning and preparedness rather than replacing expert judgement.

Machine learning and data-driven approaches

More advanced predictive approaches include machine learning methods and artificial intelligence techniques. These methods are increasingly applied in structural health monitoring to identify complex patterns within large datasets. In the context of historic churches, their application is promising, but it requires careful interpretation and continuous monitoring data.

Supervised learning models can be trained to recognize typical patterns of structural behavior under

Uczenie maszynowe i podejścia oparte na analizie danych

Bardziej zaawansowane podejścia predykcyjne obejmują metody uczenia maszynowego oraz techniki sztucznej inteligencji. Metody te są coraz częściej stosowane w monitoringu stanu technicznego konstrukcji w celu wykrywania złożonych wzorców w dużych zbiorach danych. W odniesieniu do historycznych kościołów ich zastosowanie jest obiecujące, lecz wymaga starannej interpretacji oraz zapewnienia odpowiedniej ciągłości danych.

Modele uczenia nadzorowanego mogą być trenowane w celu rozpoznawania typowych wzorców zachowania konstrukcji w zmiennych warunkach środowiskowych. Odchylenia od tych wzorców mogą być następnie identyfikowane w sposób automatyczny. Podejście to jest szczególnie przydatne w analizie danych dotyczących drgań wież i konstrukcji dzwonnych, w wypadku których wpływ warunków środowiskowych na sygnały pomiarowe może być istotny. Poprzez uczenie zależności między temperaturą, wilgotnością a odpowiedzią dynamiczną modele mogą wspomagać wyodrębnianie zmian sugerujących modyfikacje stanu konstrukcji.

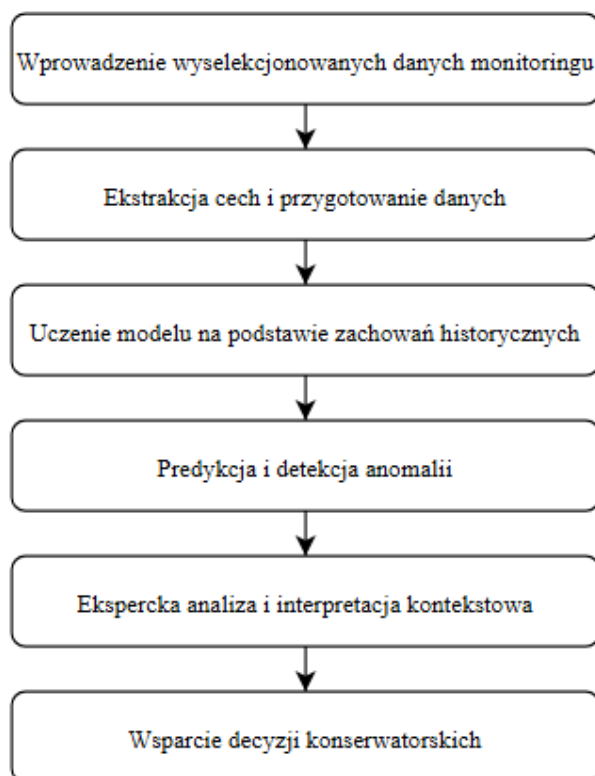
Podejścia oparte na sieciach neuronowych, w tym na sieciach konwolucyjnych stosowanych do reprezentacji szeregów czasowych, były przedmiotem badań przedstawionych w literaturze. Ich zaletą jest zdolność do wychwytywania nieliniowych zależności. Jednocześnie ich stosowanie w ochronie zabytków musi być równoważone potrzebą interpretowalności wyników. Predykcje uzyskiwane za pomocą modeli typu „czarna skrzynka” są problematyczne w praktyce konserwatorskiej, ponieważ podejmowane decyzje muszą być uzasadniane w sposób przejrzysty. Rycina 7 przedstawia koncepcyjny schemat procesu predykcyjnego opartego na analizie danych, dostosowanego do monitoringu dziedzictwa, z podkreśleniem roli weryfikacji eksperckiej.

W kontekście Śląska i Górnych Łużyc tego typu zaawansowane metody powinny być stosowane jako narzędzia uzupełniające w ramach szerszych ram analitycznych, a nie jako rozwiązania autonomiczne.

Od predykcji do decyzji konserwatorskich

Ostatnim i najistotniejszym etapem jest przełożenie wniosków predykcyjnych na działania konserwatorskie. Predykcja zyskuje znaczenie wyłącznie wówczas, gdy jest powiązana z praktycznym procesem podejmowania decyzji. W historycznych kościołach zależność ta ma często charakter pośredni. Przewidywany wzrost ryzyka wilgotnościowego może prowadzić do wzmożonego monitoringu, konsultacji z konserwatorami lub modyfikacji sposobu użytkowania obiektu, zamiast do natychmiastowej ingerencji fizycznej.

Ciągły monitoring połączony z metodami predykcyjnymi wspiera proces uczenia się. Z upływem czasu możliwe jest opracowanie modeli zachowania referencyjnego dla poszczególnych typów kościołów w regionie. Modele te pozwalają odróżnić akceptowalne



Ryc. 7. Koncepcyjny schemat procesu predykcyjnego opartego na analizie danych w monitoringu historycznych kościołów, obejmującego dane czujnikowe, uczenie modeli, detekcję anomalii oraz interpretację ekspercką

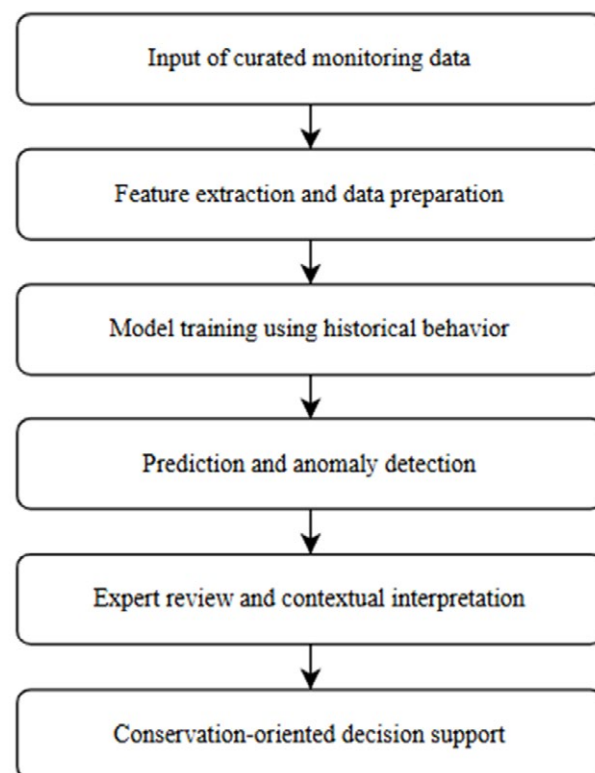


Fig. 7. Conceptual framework of a data-driven predictive process for historic church monitoring, including sensor data, model training, anomaly detection, and expert interpretation

procesy starzenia się obiektu od zmian o charakterze destrukcyjnym. W tym sensie predykcja przyczynia się do uczenia się na podstawie zachowania budowli w przeszłości i teraźniejszości, co stanowi fundament zrównoważonego zarządzania dziedzictwem.

Monitoring predykcyjny pozostaje w zgodzie z dziedzictwem kulturowym okresu reformacji na Górnych Łużycach i Śląsku. Kościoły powstałe w tym czasie były często strukturami adaptacyjnymi, kształtowanymi przez ograniczenia i kompromisy. Podobnie współczesna praktyka konserwatorska opiera się na adaptacyjnych strategiach wykorzystujących ciągłą obserwację i ostrożne prognozowanie zamiast radykalnych interwencji.

Podsumowując, metody predykcyjne przekształcają dane ciągłego monitoringu w użyteczną wiedzę prognostyczną na potrzeby ochrony zabytków. Analiza trendów, prognozowanie oraz ostrożnie stosowane modele oparte na analizie danych stanowią komplementarne narzędzia w rozpoznawaniu przyszłych zagrożeń dla historycznych kościołów. Włączone w przejrzyste i świadomie ukształtowane ramy regionalne metody te wzmacniają konserwację prewencyjną oraz wspierają długoterminowe zachowanie religijnego i architektonicznego dziedzictwa Śląska i Górnych Łużyc.

Ograniczenia, uwarunkowania i aspekty praktyczne stosowania ciągłego monitoringu

Choć ciągły monitoring z wykorzystaniem technologii Internetu Rzeczy przynosi wyraźne korzyści w ochronie historycznych kościołów na obszarze Śląska i Górnych Łużyc, jego stosowanie wiąże się z szeregiem ograniczeń, które wymagają krytycznego uwzględnienia. Ograniczenia te wynikają z immanentnych cech obiektów zabytkowych, przepisów dotyczących ochrony konserwatorskiej, uwarunkowań technicznych oraz interpretacyjnego charakteru danych z monitoringu. Rozpoznanie tych czynników ma kluczowe znaczenie dla odpowiedzialnego wykorzystania systemów monitorujących oraz dla uniknięcia nadmiernego uzależnienia od technologii kosztem oceny konserwatorskiej.

Ograniczenia architektoniczne i materiałowe historycznych kościołów

Historyczne kościoły Śląska i Górnych Łużyc charakteryzują się znacznym zróżnicowaniem pod względem technik budowlanych, składu materiałowego oraz stanu zachowania. Mury murowane często zawierają warstwy powstałe na przestrzeni stuleci, obejmujące naprawy, uzupełnienia oraz przekształcenia historyczne, które nie zawsze są w pełni udokumentowane. Złożoność ta ogranicza możliwość jednoznacznego przypisania danych z czujników do konkretnych mechanizmów zachowania materiału. Przykładowo, odczyty wilgotności w grubych murach mogą odzwierciedlać opóźnione reakcje lub procesy wewnętrznej redystry-

varying environmental conditions. Deviations from these patterns may then be identified automatically. This approach is particularly useful for analyzing vibration data from towers and bell-supporting structures, where environmental conditions may strongly influence recorded signals. By learning relationships between temperature, humidity, and dynamic response, such models can help isolate changes that may indicate modifications in structural condition.

The literature has discussed neural-network-based approaches, including convolutional neural networks applied to time-series representations. Their principal advantage is the ability to capture non-linear relationships. At the same time, their application in heritage conservation must be balanced against the need for interpretability. Predictions from “black-box” models are problematic in conservation practice because conservation decisions must be justified transparently. Figure 7 presents a conceptual framework of a data-driven predictive process adapted for heritage monitoring, highlighting the role of expert validation.

In the context of Silesia and Upper Lusatia, such advanced methods should therefore be employed as supplementary tools within a broader analytical framework rather than as autonomous solutions.

From prediction to conservation decisions

The final and most important stage is translating predictive findings into conservation actions. Prediction becomes meaningful only when linked to a practical decision-making process. In historic churches, this relationship is often indirect. A predicted increase in moisture-related risk may lead to intensified monitoring, consultation with conservation specialists, or modifications in building use rather than to immediate physical intervention.

Continuous monitoring combined with predictive methods supports a process of learning over time. As monitoring records accumulate, it becomes possible to develop reference behavior models for particular church typologies within the region. These models make it possible to distinguish acceptable aging processes from destructive changes. In this sense, prediction contributes to learning from the past and present behavior of historic structures, forming a foundation for sustainable heritage management.

Predictive monitoring is consistent with the cultural heritage of the Reformation period in Upper Lusatia and Silesia. Churches erected during this period were often adaptive structures shaped by constraints and compromises. Similarly, contemporary conservation practice relies on adaptive strategies that employ continuous observation and cautious forecasting rather than radical interventions.

In summary, predictive methods transform continuous monitoring data into actionable prognostic knowledge for heritage protection. Trend analysis, forecasting methods, and carefully applied data-driven approaches constitute complementary tools for

bucji wilgoci, a nie aktualne warunki środowiskowe panujące na powierzchni przegrody.

Kościół drewniany oraz obiekty o konstrukcji ryglowej wiążą się z dodatkowymi uwarunkowaniami. Zachowanie drewna jest silnie zależne od lokalnych gradientów wilgotności, gatunku drewna oraz historycznych sposobów jego obróbki i zabezpieczenia. Czujniki dostarczają pomiarów lokalnych, które nie zawsze są reprezentatywne dla stanu całej konstrukcji. Ponadto dostęp do kluczowych połączeń oraz ukrytych elementów nośnych bywa ograniczony, co zmniejsza możliwość instalowania czujników w lokalizacjach optymalnych z punktu widzenia analizy konstrukcyjnej.

Ograniczenia wynikające z przepisów ochrony zabytków i etyki

Przepisy dotyczące ochrony konserwatorskiej nakładają ścisłe ograniczenia w zakresie ingerencji w obiekty objęte ochroną, w szczególności w kościołach o wysokiej wartości historycznej, artystycznej lub symbolicznej. Nawet rozwiązania monitorujące o charakterze nieinwazyjnym mogą podlegać ograniczeniom ze względu na względy estetyczne lub konieczność zachowania integralności wizualnej obiektu. Na Śląsku i Górnych Łużycach wiele kościołów znajduje się pod wielopoziomową ochroną, obejmującą zarówno wpis do rejestru zabytków, jak i nadzór kościelny, co może ograniczać możliwość długoterminowej instalacji czujników.

Istotną rolę odgrywają także względy etyczne. Kościoły są przestrzeniami żywymi, wykorzystywanymi do celów kultowych, obrzędowych i wspólnotowych. Systemy monitorujące nie mogą zakłócać praktyk religijnych ani zmieniać percepcji *sacrum*. Ograniczenie to może wpływać na gęstość, rozmieszczenie oraz widoczność czujników, prowadząc do kompromisów pomiędzy optymalizacją techniczną a wrażliwością kulturową.

Ograniczenia techniczne i eksploatacyjne

Z punktu widzenia technicznego systemu ciągłego monitoringu opierają się na stabilnym działaniu czujników, niezawodnym zasilaniu oraz ciągłości transmisji danych. Na obszarach wiejskich i pogranicznych charakterystycznych dla Górnych Łużyc częste są przerwy w łączności oraz ograniczenia w dostępie do energii elektrycznej. Czujniki zasilane bateryjnie, choć odpowiednie w kontekście ochrony zabytków, podlegają ograniczeniom wynikającym z żywotności baterii, wrażliwości na temperaturę oraz stopniowego dryfu parametrów pracy [Salehi 2021]. Awarie czujników lub luki w danych utrudniają analizę długoterminową i wymagają starannej procedury walidacji.

Dodatkowym ograniczeniem są warunki środowiskowe. Czujniki instalowane w wieżach, na poddaszach oraz w nieogrzewanych przestrzeniach są narażone na kurz, wilgoć, obecność owadów oraz skrajne tempe-

identifying future threats to historic churches. When incorporated into transparent analytical frameworks and adapted to regional conditions, these methods strengthen preventive conservation and support the long-term preservation of the religious, architectural, and cultural heritage of Silesia and Upper Lusatia.

Limitations, constraints, and practical aspects of continuous monitoring

Although continuous monitoring based on Internet of Things technologies offers clear benefits for protecting historic churches in Silesia and Upper Lusatia, its application involves several limitations that require critical consideration. These limitations arise from the inherent characteristics of historic buildings, heritage-protection regulations, technical conditions, and the interpretative nature of monitoring data. Recognizing these factors is essential for the responsible use of monitoring systems and for avoiding excessive reliance on technology at the expense of conservation expertise.

Architectural and material limitations of historic churches

Historic churches in Silesia and Upper Lusatia show considerable diversity in construction techniques, material composition, and state of preservation. Masonry walls often contain layers accumulated over centuries, including repairs, additions, and historical alterations that are not always fully documented. This complexity limits the ability to unequivocally attribute sensor data to specific mechanisms governing material behavior. For example, moisture readings in thick masonry walls may reflect delayed responses or internal moisture redistribution rather than current environmental conditions at the structure's surface.

Timber churches and timber-frame buildings involve additional constraints. Wood behavior depends strongly on local moisture gradients, timber species, and historical treatment and protection methods. Sensors provide localized measurements that may not represent the condition of the entire structure. Furthermore, access to critical joints and concealed load-bearing elements is often restricted, limiting the ability to install sensors in locations that would be optimal from a structural-analysis perspective.

Constraints arising from heritage protection regulations and ethical considerations

Heritage-protection regulations impose strict restrictions on interventions in protected buildings, particularly in churches of significant historical, artistic, or symbolic value. Even non-invasive monitoring solutions may be limited by aesthetic concerns or the need to preserve the building's visual integrity. In Silesia and Upper Lusatia, many churches are protected through multiple levels of conservation oversight, including

ratury. Czynniki te mogą wpływać na dokładność pomiarów i zwiększać zakres wymaganych prac konserwacyjnych, które nie zawsze mogą być realizowane ze względu na ograniczony dostęp do obiektu.

Ograniczenia interpretacji danych i modeli predykcyjnych

Dane z monitoringu nie podlegają automatycznej interpretacji. Jednym z najistotniejszych ograniczeń jest ryzyko błędnej interpretacji wyników. Zmiany w odczytach czujników mogą być efektem nieszkodliwych wpływów sezonowych, zmian sposobu użytkowania obiektu lub dryfu pomiarowego, a nie rzeczywistej degradacji konstrukcji. Bez odpowiedniej bazy danych historycznych oraz znajomości kontekstu obiektu możliwe jest zarówno generowanie fałszywych alarmów, jak i przeoczenie rzeczywistych zagrożeń.

Modele predykcyjne, w szczególności te oparte na metodach uczenia maszynowego, wprowadzają dodatkowy poziom niepewności. Wymagają one dużych i spójnych zbiorów danych, które nie zawsze są dostępne dla wszystkich obiektów. Ponadto wyniki takich modeli mogą cechować się ograniczoną przejrzystością, co utrudnia uzasadnienie decyzji konserwatorskich wobec organów ochrony lub innych interesariuszy. W kontekście dziedzictwa, w którym interwencje nieodwracalne muszą być szczególnie starannie uzasadnione, brak transparentności stanowi poważne ograniczenie.

Zakres stosowalności i transferowalność wyników

Wreszcie wyniki uzyskiwane na podstawie systemów monitorujących wdrożonych w wybranych kościołach nie mogą być uogólniane w sposób uniwersalny. Górne Łużyce i Śląsk, mimo wspólnych cech historycznych, obejmują zróżnicowane strefy mikroklimatyczne, układy osadnicze oraz historie poszczególnych obiektów. Dane z monitoringu wymagają zatem interpretacji w jasno określonym kontekście lokalnym.

Pomimo wskazanych ograniczeń ciągły monitoring pozostaje wartościowym narzędziem, o ile jest stosowany jako element zintegrowanej strategii ochrony zabytków. Jego ograniczenia podkreślają potrzebę nadzoru eksperckiego, współpracy interdyscyplinarnej oraz ostrożnej interpretacji wyników. Zamiast zastępować metody tradycyjne, systemy monitoringu powinny uzupełniać inspekcje, badania historyczne oraz analizy materiałowe. Świadome uwzględnienie ich ograniczeń pozwala zapewnić, że technologia wspiera, a nie dominuje, podstawowe wartości ochrony zabytków i zachowania dziedzictwa.

Zakończenie części 2

Druga część artykułu jest poświęcona zagadnieniom architektury technicznej, zarządzania danymi oraz

statutory heritage protection and ecclesiastical supervision, which may limit opportunities to install monitoring equipment long-term.

Ethical considerations also play an important role. Churches are living spaces used for worship, ceremonies, and community activities. Monitoring systems must not interfere with religious practices or alter the perception of the sacred. This requirement may affect sensor density, placement, and visibility, creating trade-offs between technical optimization and cultural sensitivity.

Technical and operational limitations

From a technical perspective, continuous monitoring systems rely on stable sensor performance, reliable power supply, and uninterrupted data transmission. In the rural and borderland areas characteristic of Upper Lusatia, communication interruptions and limited access to electricity are common. Battery-powered sensors, although appropriate for heritage conservation, face limitations related to battery lifespan, temperature sensitivity, and gradual drift in operating parameters [Salehi 2021]. Sensor failures and data gaps complicate long-term analyses and require rigorous validation procedures.

Additional challenges arise from environmental conditions. Sensors installed in towers, attics, and unheated spaces are exposed to dust, moisture, insects, and extreme temperatures. These factors may reduce measurement accuracy and increase maintenance needs, which may go unmet due to limited access to the building.

Limitations of data interpretation and predictive models

Monitoring data are not self-interpreting. A major limitation is the risk of misinterpretation. Changes in sensor readings may result from harmless seasonal influences, altered building-use patterns, or measurement drift rather than actual structural deterioration. Without adequate historical datasets and a thorough understanding of the building context, there is a risk of both generating false alarms and overlooking genuine threats.

Predictive models, particularly those based on machine-learning techniques, add another layer of uncertainty. They require large and consistent datasets that are not always available for every heritage asset. Moreover, the outputs of such models may lack transparency, making it difficult to justify conservation decisions to heritage authorities or other stakeholders. In heritage conservation, where irreversible interventions require strong justification, a lack of interpretability is a significant limitation.

Applicability and transferability of results

Finally, the results obtained from monitoring systems implemented in selected churches cannot be generalized universally. Although Upper Lusatia and Silesia share common historical characteristics, they encom-

analizy informacji pozyskiwanych w ramach ciągłego monitoringu historycznych kościołów Śląska i Górnych Łużyc z wykorzystaniem technologii Internetu Rzeczy. Przedstawiono struktury systemów monitorujących dostosowane do regionalnych uwarunkowań, cykl życia danych obejmujący kontrolę jakości i metadane, a także schematy interpretacji obserwacji krótko- i długoterminowych. Szczególną uwagę poświęcono metodom predykcyjnym, w tym analizie trendów, podejściom progowym oraz wybranym technikom opartym na analizie danych, stosowanym jako wsparcie konserwacji prewencyjnej i procesu podejmowania decyzji. Omówiono również ograniczenia techniczne, interpretacyjne i etyczne stosowania ciągłego monitoringu w obiektach objętych ochroną konserwatorską, podkreślając rolę nadzoru eksperckiego i kontekstu regionalnego w odpowiedzialnym zarządzaniu dziedzictwem.

Dyskusja

Wyniki oraz podejścia przedstawione w poprzednich rozdziałach wskazują, że ciągły monitoring z wykorzystaniem technologii Internetu Rzeczy wnosi do ochrony historycznych kościołów Górnych Łużyc i Śląska znacznie więcej niż tylko wkład techniczny. Stosowany w sposób przemyślany monitoring staje się narzędziem łączącym doświadczenie historyczne ze współczesnym zarządzaniem dziedzictwem, wspierając strategię długofalowe zamiast działań krótkoterminowych. Niniejszy rozdział omawia szersze implikacje monitoringu dla rozumienia, waloryzacji oraz zarządzania dziedzictwem epoki reformacji w regionie.

Jednym z kluczowych wniosków płynących z przeprowadzonych analiz jest sposób, w jaki ciągły monitoring wspiera proces uczenia się na podstawie przeszłości. Kościoły Śląska i Górnych Łużyc kształtowały się w specyficznych realiach reformacji, obejmujących ograniczenia prawne, niedostatek zasobów oraz konieczność adaptacji. Kościoły graniczne i ucieczkowe, obiekty drewniane oraz skromne konstrukcje murowane ucieleśniają tradycję odporności architektonicznej i pragmatycznego budowania. Ciągły monitoring pozwala obserwować, jak te historyczne rozwiązania funkcjonują we współczesnych warunkach, uwzględniających zmiany klimatyczne, odmienne sposoby użytkowania obiektów oraz rosnący ruch turystyczny. Analiza reakcji historycznych materiałów i struktur w czasie dostarcza specjalistom zajmującym się ochroną zabytków wiedzy empirycznej, która uzupełnia badania historyczne i archiwalne.

Z perspektywy zarządzania dziedzictwem monitoring zapewnia obiektywną podstawę podejmowania decyzji. Dane dotyczące poziomu wilgotności, wahań temperatury, deformacji oraz odpowiedzi dynamicznej konstrukcji umożliwiają wczesną identyfikację procesów mogących zagrozić integralności historycznych kościołów. Wspiera to podejście prewencyjne w kon-

pass diverse microclimatic zones, settlement patterns, and individual building histories. Monitoring data therefore require interpretation within a clearly defined local context.

Despite these limitations, continuous monitoring remains a valuable tool when applied as part of an integrated heritage-conservation strategy. Its limitations underscore the importance of expert supervision, interdisciplinary collaboration, and cautious interpretation of results. Rather than replacing traditional methods, monitoring systems should complement visual inspections, historical research, and material investigations. Acknowledging their limitations ensures that technology supports, rather than dominates, the fundamental values of heritage conservation and preservation.

Conclusion of Part 2

The second part of this article has addressed issues related to technical system architecture, data management, and the analysis of information acquired through the continuous monitoring of historic churches in Silesia and Upper Lusatia using Internet of Things technologies. It presented monitoring system structures adapted to regional conditions, a data lifecycle incorporating quality control and metadata, and frameworks for interpreting short-term and long-term observations. The authors paid particular attention to predictive methods, including trend analysis, threshold-based approaches, and selected data-driven techniques to support preventive conservation and decision-making. The authors also discussed the technical, interpretative, and ethical limitations of continuous monitoring in heritage-protected buildings, highlighting the importance of expert supervision and regional context in the responsible management of heritage assets.

Discussion

The findings and approaches presented in the preceding sections indicate that continuous monitoring based on Internet of Things technology contributes considerably more than purely technical benefits to the protection of historic churches in Upper Lusatia and Silesia. When implemented thoughtfully, monitoring links historical experience with contemporary heritage management, supporting long-term strategies rather than short-term interventions. This section discusses the broader implications of monitoring for understanding, valorizing, and managing Reformation-era heritage in the region.

One of the principal conclusions from the analyses concerns how continuous monitoring supports learning from the past. The churches of Silesia and Upper Lusatia were shaped by the specific circumstances of the Reformation period, including legal restrictions, limited resources, and the need for adaptation. Border churches, refuge churches, timber buildings, and modest masonry structures embody a tradition of architectural resilience and pragmatic construction. Con-

serwacji, zgodne z aktualnymi zasadami ochrony zabytków. Na Śląsku i Górnych Łużycach, gdzie zasoby finansowe i techniczne przeznaczone na konserwację są często ograniczone, możliwość priorytetyzacji działań na podstawie danych ma szczególne znaczenie. Ciągły monitoring pomaga rozróżnić obiekty wymagające pilnej interwencji od tych, które mogą pozostawać pod bezpieczną obserwacją w dłuższym horyzoncie czasowym.

W dyskusji podkreślono również rolę monitoringu w procesie waloryzacji obiektów zabytkowych. Waloryzacja w ochronie dziedzictwa wykracza poza ocenę ekonomiczną i obejmuje aspekty kulturowe, historyczne oraz społeczne. Dane pozyskiwane w ramach monitoringu przyczyniają się do tego procesu poprzez dokumentowanie autentyczności materiałowej oraz stabilności konstrukcyjnej kościołów, wzmacniając tym samym argumentację na rzecz ich ochrony i właściwego użytkowania. W kontekście jubileuszu reformacji tego rodzaju dokumentacja umacnia narrację o ciągłości pomiędzy historyczną praktyką religijną a współczesnym życiem lokalnych wspólnot.

Kolejnym aspektem wymagającym omówienia jest interdyscyplinarny charakter ciągłego monitoringu. Skuteczna interpretacja danych wymaga współpracy inżynierów, konserwatorów, historyków oraz duchowieństwa. Taka współpraca odzwierciedla szersze cele konferencji i czasopisma, zakładające integrację perspektyw technicznych, historycznych i kulturowych. Na Śląsku i Górnych Łużycach, gdzie kościoły często pełnią jednocześnie funkcje zabytkowe i liturgiczne, współdziałanie przedstawicieli tych środowisk jest warunkiem koniecznym skutecznego zarządzania obiektami. Systemy monitorujące stają się wówczas narzędziami wspólnymi, ułatwiającymi dialog, a nie wyizolowanymi instalacjami technicznymi.

Jednocześnie przeprowadzona analiza potwierdza, że monitoring nie powinien być postrzegany jako rozwiązanie uniwersalne. Jego wartość wynika z integracji z tradycyjnymi metodami ochrony zabytków, obejmującymi oględziny wizualne, analizy materiałowe oraz badania historyczne. Ciągły monitoring wzbogaca te metody poprzez zapewnienie perspektywy czasowej, jednak nie może zastępować oceny eksperckiej opartej na znajomości kontekstu historycznego i zasad etyki konserwatorskiej.

Podsumowując, zastosowanie technologii ciągłego monitoringu w historycznych kościołach Śląska i Górnych Łużyc przyczynia się do pogłębionego rozumienia dziedzictwa reformacji jako dziedzictwa żywego. Dostarczając wiedzy na temat długoterminowego zachowania zabytkowych struktur, monitoring wspiera świadome zarządzanie dziedzictwem, zrównoważone użytkowanie oraz odpowiedzialną konserwację. Łączy innowacje technologiczne z zasadą uczenia się z przeszłości, przyczyniając się do zachowania religijnego, architektonicznego i kulturowego dziedzictwa regionu oraz jego autentyczności dla przyszłych pokoleń.

Continuous monitoring makes it possible to observe how these historical solutions perform under contemporary conditions, including climate change, evolving use patterns, and increasing visitor pressure. Analysis of the behavior of historic materials and structures over time provides heritage professionals with empirical knowledge that complements historical and archival research.

From a heritage-management perspective, monitoring provides an objective basis for decision-making. Data concerning moisture levels, temperature fluctuations, deformations, and dynamic structural response enable the early identification of processes that may threaten the integrity of historic churches. This supports a preventive conservation approach consistent with contemporary heritage-protection principles. In Silesia and Upper Lusatia, where financial and technical resources for conservation are often limited, the ability to prioritize data-based interventions is particularly important. Continuous monitoring helps distinguish buildings that require urgent action from those that can remain under safe observation for longer.

The discussion also highlights monitoring's role in valorizing heritage assets. Valorization in heritage conservation extends beyond economic evaluation and encompasses cultural, historical, and social dimensions. Monitoring data contribute by documenting churches' material authenticity and structural stability, strengthening the rationale for their protection and appropriate use. In the context of Reformation heritage, such documentation reinforces the narrative of continuity between historical religious practice and the contemporary life of local communities.

Another aspect worth discussing is the interdisciplinary nature of continuous monitoring. Interpreting monitoring data effectively requires collaboration among engineers, conservators, historians, and clergy. Such cooperation reflects the broader objectives of the conference and journal, which aim to integrate technical, historical, and cultural perspectives. In Silesia and Upper Lusatia, where churches frequently serve both heritage and liturgical functions, collaboration among these groups is essential for effective management. Monitoring systems thus become shared tools facilitating dialogue rather than isolated technical installations.

At the same time, the analysis confirms that monitoring should not be regarded as a universal solution. Its value derives from integration with traditional heritage conservation methods, including visual inspections, material investigations, and historical research. Continuous monitoring enriches these approaches by providing a temporal perspective, but it cannot replace expert assessment grounded in historical context and conservation ethics.

In summary, applying continuous monitoring technologies in the historic churches of Silesia and Upper Lusatia contributes to a deeper understanding of Reformation heritage as a living heritage resource. By providing knowledge about the long-term behavior of historic structures, monitoring supports informed

Wnioski

Przeprowadzona analiza wykazała, że ciągły monitoring oparty na technologiach Internetu Rzeczy stanowi wartościowe i kontekstowo wrażliwe narzędzie ochrony historycznych kościołów na obszarze Górnych Łużyc i Śląska. Poprzez osadzenie rozwiązań technicznych w pogłębionym rozumieniu historii regionu, typologii architektonicznej oraz zasad etyki konserwatorskiej wykazano, że monitoring może wspierać nie tylko bezpieczeństwo konstrukcyjne, lecz także szersze cele ochrony dziedzictwa ukształtowane przez spuściznę reformacji.

Jednym z głównych wniosków jest stwierdzenie, że skuteczność monitoringu zależy od jego dostosowania do lokalnych uwarunkowań. Kościoły Śląska i Górnych Łużyc charakteryzują się znacznym zróżnicowaniem typologicznym i materiałowym, co wymaga stosowania zróżnicowanych strategii monitorowania. Miejskie kościoły murowane z wieżami wymagają długoterminowej obserwacji deformacji oraz odpowiedzi dynamicznej, natomiast kościoły drewniane i o konstrukcji ryglowej – szczegółowego śledzenia procesów związanych z wilgocią. Kościoły graniczne i ucieczkowe uwiadamiają znaczenie systemów niskoenergetycznych, autonomicznego zasilania oraz niezawodnej transmisji danych dostosowanej do warunków wiejskich i peryferyjnych. Uznanie tych cech regionalnych jest niezbędne, aby dane techniczne mogły zostać przekształcone w użyteczną wiedzę konserwatorską.

W pracy potwierdzono również, że ciągły monitoring uzupełnia, lecz nie zastępuje, tradycyjne metody ochrony zabytków. Okresowe inspekcje, badania historyczne oraz analizy materiałowe pozostają nieodzowne. Monitoring rozszerza te praktyki, zapewniając ciągłość obserwacji w czasie oraz ujawniając procesy rozwijające się powoli, niewidoczne podczas krótkookresowej oceny. W tym sensie ciągły monitoring wzmacnia podejście konserwacji prewencyjnej, mające szczególne znaczenie w odniesieniu do obiektów sakralnych o wysokiej wartości historycznej, które pozostają w czynnym użytkowaniu.

Istotnym wnioskiem jest także kwestia interpretacji danych. Systemy monitorujące generują znaczne ilości informacji, jednak ich wartość ujawnia się dopiero poprzez staranną analizę i właściwe osadzenie kontekstowe. Analiza trendów oraz metody progowe stanowią przejrzyste i przyjazne dla konserwatorów narzędzia identyfikacji zagrożeń, natomiast metody prognostyczne i podejścia oparte na analizie danych mogą dostarczać dodatkowych informacji, o ile są stosowane z należytą ostrożnością. W opracowaniu podkreślono, że metody predykcyjne powinny wspierać ocenę ekspercką, a nie automatyzować proces podejmowania decyzji, zwłaszcza w odniesieniu do obiektów objętych ochroną prawną.

Z szerszej perspektywy zarządzania dziedzictwem ciągły monitoring przyczynia się do świadomej waloryzacji, zrównoważonego użytkowania oraz odpowiadającego

heritage management, sustainable use, and responsible conservation practice. It connects technological innovation with the principle of learning from the past, contributing to the preservation of the region's religious, architectural, and cultural heritage and safeguarding its authenticity for future generations.

Conclusions

The analysis in this study has shown that continuous monitoring based on Internet of Things technologies is a valuable, context-sensitive tool for protecting historic churches in Upper Lusatia and Silesia. By embedding technical solutions within a thorough understanding of regional history, architectural typologies, and conservation ethics, the study shows that monitoring can support not only structural safety but also broader heritage conservation objectives associated with the legacy of the Reformation.

One principal conclusion is that monitoring effectiveness depends on its adaptation to local conditions. Churches in Silesia and Upper Lusatia exhibit considerable typological and material diversity, requiring differentiated monitoring strategies. Urban masonry churches with towers require long-term observation of deformation processes and dynamic response, whereas timber and timber-frame churches require detailed monitoring of moisture-related phenomena. Border and refuge churches highlight the importance of low-power systems, autonomous power supply, and reliable data transmission adapted to rural and peripheral conditions. Recognizing these regional characteristics is essential to transform technical data into meaningful conservation knowledge.

The study also confirms that continuous monitoring complements rather than replaces traditional heritage-conservation methods. Periodic inspections, historical research, and material investigations remain indispensable. Monitoring extends these practices by providing continuity of observation over time and by revealing slowly developing processes that may remain undetected during short-term assessments. In this respect, continuous monitoring strengthens the preventive conservation approach, which is particularly important for religious heritage buildings of high historical significance that remain in active use.

An important conclusion also concerns the interpretation of monitoring data. Monitoring systems generate substantial quantities of information, yet their value emerges only through careful analysis and appropriate contextualization. Trend analysis and threshold-based approaches provide transparent, conservation-friendly tools for identifying potential risks, while forecasting methods and data-driven approaches can offer additional insights when applied with appropriate caution. The study emphasizes that predictive methods should support expert judgment rather than automate decision-making, particularly for buildings protected by heritage legislation.

wiedzialnego kształtowania ruchu turystycznego. Na Śląsku i Górnych Łużycach, gdzie kościoły związane z reformacją odgrywają istotną rolę w budowaniu tożsamości kulturowej i zaangażowania społecznego, monitoring wspiera wyważone podejście łączące dostępność z ochroną. Dane pozyskiwane z systemów monitorujących sprzyjają również współpracy interdyscyplinarnej między inżynierami, konserwatorami, historykami, duchowieństwem oraz administracją lokalną, wzmacniając zintegrowane zarządzanie dziedzictwem.

Dalsze badania powinny koncentrować się na integracji danych z monitoringu z cyfrowymi systemami dokumentacji, analizach porównawczych obejmujących sieci kościołów w skali regionalnej oraz długoterminowej ocenie skuteczności decyzji konserwatorskich wspieranych przez monitoring. Rozszerzanie wspólnych zbiorów danych dla kościołów Śląska i Górnych Łużyc pozwoli pogłębić wiedzę na temat zachowania materiałów w warunkach zmieniającego się klimatu i przeobrażeń społecznych.

Podsumowując, ciągły monitoring stanowi istotne ogniwo łączące doświadczenie historyczne epoki reformacji ze współczesną praktyką ochrony zabytków. Poprzez powiązanie innowacji technologicznych ze specyfiką regionalną oraz wartościami konserwatorskimi wspiera on zrównoważone zachowanie religijnego, architektonicznego i kulturowego dziedzictwa regionu dla przyszłych pokoleń.

From a broader heritage-management perspective, continuous monitoring contributes to informed valorization, sustainable use, and responsible management of visitor activity. In Silesia and Upper Lusatia, where Reformation-era churches play a significant role in shaping cultural identity and community engagement, monitoring supports a balanced approach that combines accessibility with protection. Monitoring data also promote interdisciplinary cooperation among engineers, conservators, historians, clergy, and local authorities, strengthening integrated heritage management.

Future research should focus on integrating monitoring data with digital documentation systems, conducting comparative analyses across church networks at the regional scale, and evaluating the long-term effectiveness of monitoring-supported conservation decisions. Expanding shared datasets for churches in Silesia and Upper Lusatia will contribute to a more comprehensive understanding of material behavior under climatic change and evolving social contexts.

In conclusion, continuous monitoring represents an important link between the historical experience of the Reformation period and contemporary heritage conservation practice. By combining technological innovation with regional specificity and conservation values, it supports the sustainable preservation of the region's religious, architectural, and cultural heritage and helps safeguard its authenticity for future generations.

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

- Abruzzese Donato, Micheletti Andrea, Tiero Alessandro, Cosentino Manuel, Forconi Damiano, Grizzi Gianmarco, Scarano Gianluca, Vuth Sreymom, Abiuso Pierluigi, *IoT sensors for modern structural health monitoring. A new frontier*, „Procedia Structural Integrity” 2020, t. 25.
- Almohsen Ahmed S., *Challenges facing the use of remote sensing technologies in the construction industry: A review*, „Buildings” 2024, t. 14.
- 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.
- Dolińska Noëlla, Wojciechowska Gabriela, Bac-Bronowicz Joanna, Bednarz Łukasz, *GEPreS: A Geospa-*

tially Enabled Predictive Recommendation System for the Preventive Management of Historical Buildings, „ISPRS International Journal of Geo-Information” 2025a, t. 15, nr 1.

- Dolińska Noëlla, Wojciechowska Gabriela, Bednarz Łukasz, *Monitoring Environmental and Structural Parameters in Historical Masonry Buildings Using IoT LoRaWAN-Based Wireless Sensors*, „Buildings” 2025b, 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.
- Forlesi Mattia, Esposito Alfonso, Ciabattini Leonardo, Sciallo Luca, Di Felice Marco, Kamali Soroosh, *An IoT-AI Toolchain for Structural Health Monitoring*, [w:] *IEEE International Symposium on Measurements and Networking*, Rome 2024.

- Kampli Gurunath, Chickerur Satyadhyam, Chitawadagi Manojkumar V., *Real-time in-situ strength monitoring of concrete using IoT*, „Materials Today: Proceedings” 2023, t. 88.
- 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.
- Salehi Hadi, Burgueño Rigoberto, Chakrabartty Shantanu, Lajnef Nizar, Alavi Amir H., *A comprehensive review of self-powered sensors in civil infrastructure*, „Engineering Structures” 2021, t. 234.
- 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.
- Zonno Giacomo, Aguilar Rafael, Boroschek Rubén, Lourenço Paulo B., *Automated long-term dynamic monitoring using hierarchical clustering and adaptive modal tracking: validation and applications*, „Journal of Civil Structural Health Monitoring” 2018, t. 8.

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 warunkowaniach prawnych, społecznych i materiałowych, w tym kościoły graniczne, kościoły ucieczkowe, 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 form 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, such as border churches, refuge churches, urban masonry churches, and timber religious buildings. Many of these structures remain in use today and are subject to gradual structural aging and environmental impacts that challenge their preservation.

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 tailored to the regional characteristics of these buildings, including construction materials, climatic conditions, and conservation requirements. It examines sensor types, installation principles, data transmission methods, and power-supply solutions suitable for heritage-protected sites. Particular attention is paid to interpreting data from short-term and long-term monitoring and 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. Combining modern monitoring technologies with knowledge of the regional heritage shaped by the Reformation illustrates an approach that integrates historical experience with contemporary conservation practice.