

Gabriela Wojciechowska*

orcid.org/0000-0001-7041-5373

Noëlla Dolińska**

orcid.org/0009-0007-7163-0375

Cyfrowa dokumentacja i HBIM na przykładzie kościołów Śląska i Górnych Łużyc – dane, jakość i zarządzanie informacją w praktyce konserwatorskiej

Digital Documentation and HBIM in Churches in Silesia and Upper Lusatia: Data, Quality, and Information Management in Conservation Practice

Słowa kluczowe: HBIM, fotogrametria, Górne Łużycy, Śląsk, kościoły drewniane, zarządzanie projektami, zarządzanie jakością, ISO 19650, konserwacja zapobiegawcza

Keywords: HBIM, photogrammetry, Upper Lusatia, Silesia, wooden churches, project management, quality management, ISO 19650, preventive conservation

Wstęp

Artykuł bada, w jaki sposób połączenie nowoczesnych technik pomiarowych, takich jak naziemny skanowanie laserowe (TLS) i fotogrametria, z Heritage Building Information Modelling (HBIM) może zostać wykorzystane w ramach uporządkowanego procesu dokumentacji. Podejście to wspiera tworzenie danych o wysokiej i kontrolowanej jakości oraz służy ochronie dziedzictwa sakralnego na przykładzie obiektów sakralnych Śląska i Górnych Łużyc. Kontekst regionalny, obejmujący zróżnicowane typologie i wielowarstwowe uwarunkowania historyczne, wymaga metody, która łączy precyzyjne techniki pomiarowe z uporządkowanym zarządzaniem informacją [Chen et al. 2025; Malinverni et al. 2019; Kantorowicz 2023; Szałygin 2003; Dolińska et al. 2025].

W badaniach zastosowano podejście wielosensorowe, łączące TLS – zapewniający wiarygodną reprezentację geometrii – z fotogrametrią, dostarczającą szczegółowych informacji o powierzchni. Integracja tych

Introduction

This article investigates how the integration of modern surveying techniques, such as terrestrial laser scanning (TLS) and photogrammetry, with Heritage Building Information Modelling (HBIM) can be employed within a structured documentation workflow. The proposed approach supports the production of high-quality, quality-controlled datasets and contributes to the preservation of religious heritage, using selected churches in Silesia and Upper Lusatia as cases. The regional context, characterized by diverse architectural typologies and multilayered historical influences, requires a methodology that combines accurate surveying techniques with structured information management [Chen et al. 2025; Malinverni et al. 2019; Kantorowicz 2023; Szałygin 2003; Dolińska et al. 2025].

The study adopts a multi-sensor approach combining TLS, which provides a reliable representation of geometry, with photogrammetry, which delivers detailed surface information. The integration of these methods enables

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

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

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

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

Cytowanie / Citation: Wojciechowska G., Dolińska N. Digital Documentation and HBIM in Churches in Silesia and Upper Lusatia: Data, Quality, and Information Management in Conservation Practice. *Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation* 2026, 86S:292–311

Otrzymano / Received: 20.03.2025 • **Zaakceptowano / Accepted:** 27.03.2026

doi: 10.48234/WK86SHBIM

Praca dopuszczona do druku po recenzjach

Article accepted for publishing after reviews

metod umożliwia uzyskanie spójnych chmur punktów, siatek i ortofotoplanów, stanowiących podstawę budowy modeli HBIM o rozbudowanej warstwie semantycznej [Remondino, Rizzi 2010; Yastikli 2007; Fassi et al. 2010].

Po 1945 roku wiele obiektów sakralnych regionu zostało opuszczonych lub objętych rozproszonym zarządzaniem, co ujawniło istotne luki w dokumentacji i organizacji danych. Niniejsze opracowanie odpowiada na te wyzwania poprzez powiązanie wielosensorowych pomiarów z procedurami zarządzania informacją, umożliwiającymi lepsze podejmowanie decyzji konserwatorskich nawet w warunkach ograniczonego dostępu do obiektów lub rozproszonej odpowiedzialności interesariuszy [Banaś 1966; Szczepankiewicz-Battek 2015; Sokół 2018; Penjor et al. 2024; Alshawabkeh et al. 2024].

Podstawa teoretyczna łączy HBIM z zarządzaniem jakością i zarządzaniem projektem. HBIM rozszerza zasady BIM na historyczną substancję budowlaną, integrując geometrię, materiały, stan zachowania i historię napraw z opisem układów przestrzennych oraz zestawami modelowanych elementów. Tak ustrukturyzowane dane mogą wspierać podejmowanie decyzji konserwatorskich. Literatura przedmiotu i opracowania metodyczne podkreślają, że wdrażanie HBIM wymaga zarządzania informacją zgodnego ze standardami, jasno określonego planu jakości oraz procedur weryfikacji dostosowanych do nieortogonalnych geometrii i nawarstwień faz przekształceń typowych dla dziedzictwa sakralnego [López et al. 2018; Penjor et al. 2024]. Badania nad zastosowaniem BIM w istniejących obiektach wskazują na potrzebę stosowania interoperacyjnych struktur danych oraz jasno zdefiniowanych procesów, aby prace mogły przebiegać sprawnie w warunkach niepewności i złożoności w całym cyklu projektu [Dolińska et al. 2025]. Wymóg ten jest szczególnie istotny przy odwzorowywaniu historycznych detali oraz geometrii nieortogonalnych na wysokich poziomach szczegółowości [Brumana et al. 2019; Volk et al. 2014; Bruno, Roncella 2018; Bruno, Roncella 2019].

Artykuł proponuje powiązanie prac terenowych, procesu pozyskiwania danych, generowania ortofotoplanów oraz modelowania HBIM z aspektami zarządzania projektem, obejmującymi zakres prac, harmonogram i zarządzanie ryzykiem, a także z zarządzaniem jakością (QA/QC), obejmującymi m.in. wskaźnik pokrycia, gęstość punktów, błąd RMS rejestracji i kompletność metadanych. Włączenie wielojęzycznych metadanych oraz konsultacji społecznych uwzględni lokalny i transgraniczny charakter dziedzictwa.

Łącząc podejście wielosensorowe z łaodem informacyjnym i udokumentowanymi procedurami jakości w odniesieniu do dziedzictwa sakralnego, badanie rozwija model zarządzania, który łączy wysoką precyzję techniczną z zasadami zarządzania projektem i jakością w dokumentacji oraz ochronie dziedzictwa [Penjor et al. 2024; Alshawabkeh et al. 2024; Chen et al. 2025].

the generation of consistent point clouds, meshes, and orthophotos that form the basis for HBIM models enriched with an extensive semantic information layer [Remondino, Rizzi 2010; Yastikli 2007; Fassi et al. 2010].

After 1945, many religious buildings in the region were abandoned or became subject to fragmented management structures, revealing significant deficiencies in documentation and data organization. The present study addresses these challenges by linking multi-sensor surveying methods with information management procedures that support improved conservation decision-making, even in situations involving restricted site access or dispersed stakeholder responsibilities [Banaś 1966; Szczepankiewicz-Battek 2015; Sokół 2018; Penjor et al. 2024; Alshawabkeh et al. 2024].

The theoretical framework combines HBIM principles with quality management and project management methodologies. HBIM extends the BIM concept to historic buildings by integrating geometry, material characteristics, conservation condition, and repair history with descriptions of spatial layouts and modelled component assemblies. Such structured datasets can effectively support conservation decision-making processes. Existing literature and methodological studies emphasize that successful HBIM implementation requires standards-based information management, clearly defined quality plans, and verification procedures adapted to non-orthogonal geometries and the complex stratification of transformation phases characteristic of religious heritage buildings [López et al. 2018; Penjor et al. 2024]. Research on BIM applications for existing buildings further highlights the need for interoperable data structures and clearly defined workflows to ensure efficient project delivery under conditions of uncertainty and complexity throughout the project lifecycle [Dolińska et al. 2025]. These requirements become particularly important when modelling historic details and non-orthogonal geometries at high levels of detail [Brumana et al. 2019; Volk et al. 2014; Bruno, Roncella 2018; Bruno, Roncella 2019].

The article proposes an integrated framework linking fieldwork, data acquisition, orthophoto generation, and HBIM modelling with project management activities, including scope definition, scheduling, and risk management, as well as quality assurance and quality control (QA/QC) procedures. These procedures include the monitoring of key indicators such as coverage rate, point density, registration RMS error, and metadata completeness. The incorporation of multilingual metadata and community consultation processes reflects the local and cross-border character of the heritage assets under investigation.

By combining a multi-sensor surveying strategy with information governance and documented quality procedures tailored to religious heritage, the study develops a management model that integrates high technical accuracy with project and quality management principles in heritage documentation and conservation practice [Penjor et al. 2024; Alshawabkeh et al. 2024; Chen et al. 2025].

Poniższy rozdział przedstawia metodykę cyfrowej dokumentacji oraz zarządzania dziedzictwem sakralnym. Podejście integruje wielosensorowe pozyskiwanie danych (naziemny skanিং laserowy oraz fotogrametrię bliskiego zasięgu), ukierunkowane semantycznie modelowanie HBIM oraz uporządkowane ramy zarządzania projektem i jakością, które porządkują procesy i rezultaty w całym cyklu życia przedsięwzięcia [Taileb et al. 2023; Alshawabkeh et al. 2024].

Fotogrametria i naziemny skanিং laserowy

Fotogrametria bliskiego zasięgu umożliwia pozyskanie geometrii 3D (ryc. 1) oraz metrycznych ortofotoplanów na podstawie serii zachodzących na siebie zdjęć wykonanych zgodnie z zaplanowaną geometrią. Kluczowe etapy obejmują przygotowanie sieci ujęć o odpowiednim pokryciu, wyznaczenie punktów kontrolnych oraz dopasowanie obrazów prowadzące do rekonstrukcji gęstej chmury punktów i ortorektyfikacji. Do najważniejszych czynników wpływających na jakość należą stabilne i równomierne oświetlenie, właściwy dobór kątów fotografowania oraz utrzymanie jednolitej skali (GSD), co zapewnia wiarygodne odwzorowanie detalu powierzchni i umożliwia późniejsze analizy porównawcze [Yilmaz et al. 2007; Fassi et al. 2010; 3D recording 2016; Ulvi 2021].

Naziemny skanিং laserowy (TLS) dostarcza gęstych chmur punktów odwzorowujących geometrię dużych przestrzeni. Rozmieszczenie stanowisk planuje się tak, aby uzyskać pełne pokrycie oraz zminimalizować obszary niewidoczne, a rejestracja opiera się na stabilnym zestawie punktów odniesienia lub dopasowaniu chmura-do-chmury. Kontrola błędu RMS na etapie rejestracji jest kluczowa dla późniejszej integracji danych z HBIM i analiz deformacji. Połączenie TLS z fotogrametrią pozwala zrównoważyć precyzyjne odwzorowanie geometrii z wysokorozdzielczą informacją o powierzchni, zapewniając bardziej kompletny materiał wyjściowy niż zastosowanie pojedynczej metody [Grussenmeyer et al. 2011; Kantorowicz 2023; Yastikli 2007]. Połączenie TLS z fotogrametrią z drona pozwala uzupełnić chmurę punktów o obszary niedostępne dla skanera (ryc. 2).

Zintegrowany projekt pozyskiwania danych obejmuje trzy uzupełniające się zakresy ujęć. Po pierwsze, TLS rejestruje geometrię całego obiektu (m.in. ściany, empory i sklepienia). Po drugie, fotogrametria w skali detalu służy do dokumentowania elementów architektonicznych (ornamentyka, maswerki, empory i ołtarze). Po trzecie, fotogrametria w skali mikrouszkodzeń pozwala uchwycić zmiany materiałowe i stan powierzchni (np. rysy, pęknięcia, wykwyty soli i rozwarstwienia). Połączenie tych zakresów oraz łączne stosowanie TLS i fotogrametrii zwiększa wiarygodność pomiarów, ułatwia opracowanie ortofotoplanów stanu i budowę modeli HBIM z rozbudowaną warstwą opi-

This section presents the methodology for the digital documentation and management of religious heritage. The proposed approach integrates multi-sensor data acquisition, including terrestrial laser scanning and close-range photogrammetry, semantically oriented HBIM modelling, and a structured framework for project and quality management that governs processes and deliverables throughout the project lifecycle [Taileb et al. 2023; Alshawabkeh et al. 2024].

Photogrammetry and terrestrial laser scanning

Close-range photogrammetry enables the acquisition of 3D geometry (Fig. 1) and metric orthophotos from a series of overlapping images captured according to a predefined imaging geometry. The main stages include the preparation of an image network with adequate overlap, the establishment of control points, and image matching leading to dense point-cloud reconstruction and orthorectification. Key factors that affect quality include stable and uniform lighting conditions, appropriate image acquisition angles, and maintenance of a consistent ground sampling distance (GSD), ensuring reliable representation of surface detail and enabling subsequent comparative analyses [Yilmaz et al. 2007; Fassi et al. 2010; 3D Recording 2016; Ulvi 2021].

Terrestrial laser scanning (TLS) provides dense point clouds that represent the geometry of large architectural spaces. Scan positions are planned to achieve complete coverage while minimizing occluded areas, and registration is based either on a stable set of reference targets or cloud-to-cloud alignment. RMS error control during registration is essential for the subsequent integration of datasets within HBIM environments and for deformation analyses. Combining TLS with photogrammetry balances accurate geometric representation with high-resolution surface information, producing a more comprehensive dataset than the use of either method alone [Grussenmeyer et al. 2011; Kantorowicz 2023; Yastikli 2007]. The integration of TLS with UAV-based photogrammetry additionally allows point clouds to be supplemented in areas inaccessible to the scanner (Fig. 2).

The integrated data acquisition strategy comprises three complementary levels of recording. First, TLS captures the geometry of the entire building, including walls, galleries, and vaults. Second, detail-scale photogrammetry is employed to document architectural features such as ornamentation, tracery, galleries, and altars. Third, micro-scale photogrammetry records material alterations and surface conditions, including cracks, fissures, salt efflorescence, and delamination. The integration of these scales, together with the combined use of TLS and photogrammetry, improves measurement reliability, facilitates the production of condition orthophotos, supports HBIM modelling with an enriched descriptive layer, and compensates



Ryc. 1. Fotogrametria – fragment elewacji południowej katedry wrocławskiej, oprac. własne

Fig. 1. Photogrammetry of a fragment of the southern facade of Wrocław Cathedral, original work



Ryc. 2. Chmura punktów ze skaningu laserowego (uzupełniona fotogrametrią), oprac. własne

Fig. 2. Point cloud derived from terrestrial laser scanning supplemented with photogrammetric data, original work

sową, a także kompensuje ograniczenia każdej z metod, zapewniając kompletne i diagnostyczne zbiory danych [Remondino, Rizzi 2010; Penjor et al. 2024].

Heritage Building Information Modelling: koncepcja, integracja semantyczna i wyzwania modelowania

HBIM (ryc. 3) rozszerza zasady BIM na obiekty zabytkowe, umożliwiając reprezentację nieregularnych form architektonicznych, detali historycznych oraz nawarstwień powstałych w wyniku przekształceń obiektu. Model obejmuje ustrukturyzowane semantycznie komponenty powiązane z układami przestrzennymi, materiałami, stanem zachowania oraz historią interwencji, co pozwala odwzorować specyfikę zabytkowej substancji. W dziedzictwie sakralnym obejmuje to m.in. ołtarze, organy, malowidła, elementy ciesielskie, więźbę dachową oraz wyposażenie o wysokiej wartości artystycznej.

HBIM stanowi zintegrowane repozytorium, w którym dane geometryczne pozyskane za pomocą TLS i fotogrametrii są łączone z metadanymi opisującymi materiały, procesy degradacji oraz przeprowadzone interwencje. Tak ustrukturyzowany zasób informacji wspiera analizy porównawcze, mapowanie stanu zachowania oraz planowanie konserwacji zapobiegawczej. Wyzwaniem pozostają m.in. ograniczone biblioteki detali historycznych, złożone geometrie nieortogonalne oraz konieczność zachowania spójności semantycznej podczas modelowania na podstawie chmury punktów. W procesie tym ważne jest zachowanie równowagi między wiernością geometryczną a czytelną strukturą informacji, co bezpośrednio wpływa na interoperacyjność modeli i ich użyteczność w długoterminowym

for the limitations of individual methods by providing complete and diagnostically valuable datasets [Remondino, Rizzi 2010; Penjor et al. 2024].

Heritage Building Information Modelling: concept, semantic integration and modelling challenges

HBIM (Fig. 3) extends BIM principles to historic buildings by enabling the representation of irregular architectural forms, historical details, and stratified layers resulting from successive transformations of a structure. The model consists of semantically structured components associated with spatial layouts, materials, conservation condition, and intervention history, thereby reflecting the specific characteristics of heritage fabric. In the context of religious heritage, this includes altars, organs, wall paintings, timber elements, roof structures, and furnishings of high artistic value.

HBIM serves as an integrated repository in which geometric data acquired through TLS and photogrammetry are linked with metadata describing materials, degradation processes, and conservation interventions. Such a structured information resource supports comparative analysis, condition mapping, and preventive conservation planning. Persistent challenges include the limited availability of libraries of historical components, the complexity of non-orthogonal geometries, and the need to maintain semantic consistency during point-cloud-based modelling. Achieving a balance between geometric accuracy and a clear information structure remains essential, as it directly affects model interoperability and long-term applicability for herit-



Ryc. 3. Model HBIM kościoła w Żeliszowie; źródło: Bednarz 2023
 Fig. 3. HBIM model of the church in Żeliszów; source: Bednarz 2023

zarządzaniu dziedzictwem [López et al. 2018; Penjor et al. 2024; Remondino, Rizzi 2010].

W najnowszych opracowaniach podkreśla się znaczenie łączenia HBIM z danymi wielosensorowymi, które umożliwiają tworzenie wysokiej jakości ortofotoplanów i odwzorowań degradacji, wykorzystywanych w procesach konserwatorskich [Chen et al. 2025; Alshawabkeh et al. 2024].

W celu zapewnienia spójności semantycznej modeli HBIM w projekcie opracowano jednolity zestaw klas komponentów wraz z atrybutami stanu, materiału oraz historii interwencji. Szczegółowy schemat klas stosowano konsekwentnie we wszystkich studiach przypadków, co wspiera interoperacyjność, powtarzalność i porównywalność modeli.

Zarządzanie informacją, jakość i standardy

Zarządzanie informacją opiera się na wspólnym środowisku danych (CDE), które organizuje proces gromadzenia, przeglądów i przekazywania informacji. CDE umożliwia kontrolowany obieg plików, wersjonowanie oraz dokumentowanie decyzji, wspierając integrację danych pomiarowych i modeli HBIM zgodnie z zasadami określonymi w normach ISO 19650. Tabela 1 przedstawia najważniejsze pojęcia i definicje stosowane w projekcie. Kluczową rolę odgrywa także jednolity

age management [López et al. 2018; Penjor et al. 2024; Remondino, Rizzi 2010].

Recent studies emphasize the importance of integrating HBIM with multi-sensor datasets that enable the production of high-quality orthophotos and degradation maps used in conservation processes [Chen et al. 2025; Alshawabkeh et al. 2024].

To ensure semantic consistency across HBIM models, a unified classification system of components, including condition, material, and intervention-history attributes, was developed within the project. The same class structure was applied consistently across all case studies, supporting interoperability, repeatability, and model comparability.

Information management, quality and standards

Information management is based on a Common Data Environment (CDE), which organizes the processes of information collection, review, and exchange. The CDE enables controlled file circulation, version control, and decision tracking, thereby supporting the integration of survey data and HBIM models in accordance with the principles defined in ISO 19650 standards. Table 1 presents the key concepts and definitions applied within the project. A consistent metadata structure describing data prove-

Pojęcie	Definicja
HBIM Heritage Building Information Modelling	Rozszerzenie BIM na obiekty zabytkowe. Model łączy geometrię z informacjami o materiałach, stanie zachowania i interwencjach, a elementy są opisane w sposób ustrukturyzowany i powiązane z układem przestrzennym obiektu.
Fotogrametria	Technika, która na podstawie zachodzących na siebie zdjęć (z kontrolą układu i ekspozycji) wyznacza geometrię 3D i tworzy ortofotoplany o własnościach metrycznych. Szczególnie przydatna do wysokorozdzielczej dokumentacji powierzchni w zabytkach.
TLS Terrestrial Laser Scanning	Naziemny skanowanie laserowe. Dostarcza gęste chmury punktów odwzorowujące geometrię obiektu oraz może stanowić podstawę do analizy odkształceń i deformacji.
QA Quality Assurance	Zapewnianie jakości – ustalone wcześniej procedury, które pomagają utrzymać zgodność pracy ze standardami (np. listy kontrolne, skrypty weryfikacyjne, zapisy przeglądów i akceptacji w CDE).
QC Quality Control	Kontrola jakości – sprawdzenia wykonywane na danych i modelach, które potwierdzają spełnienie wymagań jakościowych (np. błąd RMS rejestracji skanów, GSD, dokładność ortofotoplanów, poprawność klasyfikacji HBIM).
AC Acceptance Criteria	Wymagania jakościowe – zdefiniowane na starcie projektu wartości docelowe i dopuszczalne odchylenia, np. wskaźnik pokrycia, gęstość punktów, błąd RMS rejestracji skanów, GSD, kompletność metadanych, które muszą być spełnione, aby wynik został przyjęty.
CDE Common Data Environment	Wspólne środowisko danych to centralne miejsce pracy z danymi, w którym dokumenty i modele są przeglądane i zatwierdzane (akceptacje), przekazywane w kontrolowany sposób właściwym stronom, utrzymując spójne wersje i opisy zmian (rewizje) oraz są archiwizowane z ustalonym dostępem i prawami.
IFC Industry Foundation Classes	Otwarta specyfikacja wymiany danych wspierająca interoperacyjność HBIM.
Typ elementu / zestaw modelowanych elementów	Ustandaryzowany opis klasy komponentów (np. żebro, pole sklepienia, słup, złącze ciesielskie) z atrybutami geometrycznymi i semantycznymi, niezależny od konkretnego oprogramowania.

Tab. 1. Kluczowe pojęcia i definicje; wszystkie tabele opracowane przez autorki

Term	Definition
HBIM Heritage Building Information Modelling	An extension of BIM for heritage buildings. The model combines geometry with information on materials, condition assessment, and interventions, while building components are described in a structured manner and linked to the spatial organization of the asset.
Photogrammetry	A technique that derives 3D geometry and produces metric orthophotos from overlapping images acquired under controlled geometric and exposure conditions. It is particularly suitable for high-resolution documentation of heritage surfaces.
TLS Terrestrial Laser Scanning	It generates dense point clouds representing building geometry and can serve as a basis for deformation and displacement analyses.
QA Quality Assurance	Quality assurance refers to predefined procedures that help maintain compliance with established standards, such as checklists, validation scripts, review records, and approval workflows within the Common Data Environment (CDE).
QC Quality Control	Quality control consists of inspections and checks performed on datasets and models to verify compliance with quality requirements, including scan registration RMS error, GSD, orthophoto accuracy, and the correctness of HBIM classification.
AC Acceptance Criteria	Quality requirements defined at the beginning of the project, including target values and permissible deviations for parameters such as coverage rate, point density, scan registration RMS error, GSD, and metadata completeness, which must be met for deliverables to be accepted.
CDE Common Data Environment	A Common Data Environment is a centralized workspace in which documents and models are reviewed and approved, exchanged with stakeholders in a controlled manner, maintained through consistent versioning and revision records, and archived according to predefined access rights and permissions.
IFC Industry Foundation Classes	An open data-exchange specification supporting interoperability between HBIM and other digital platforms.
Element Type / Modelled Element Set	A standardized description of a component class (e.g. rib, vault bay, column, timber joint) with geometric and semantic attributes, independent of any specific software platform.

Table 1. Key concepts and definitions; all tables prepared by the authors

zestaw metadanych opisujących pochodzenie danych, materiały, stan zachowania oraz historię interwencji, wspierający interoperacyjność i długoterminowe wykorzystanie danych.

Zapewnienie jakości opiera się na jasno określonych wymaganiach technicznych, obejmujących m.in. pokrycie, gęstość punktów, wartość błędu RMS rejestracji, GSD oraz kompletność metadanych, a także na rutynowych procedurach QA/QC, które weryfikują jakość danych pomiarowych i modeli przed ich zatwierdzeniem. Wczesne zdefiniowanie kryteriów jakości ogranicza konieczność powtórnych pomiarów i ułatwia integrację danych wielosensorowych z modelami HBIM [Penjor et al. 2024; Bruno, Roncella 2019].

nance, materials, conservation condition, and intervention history also plays a crucial role in supporting interoperability and the long-term usability of information resources.

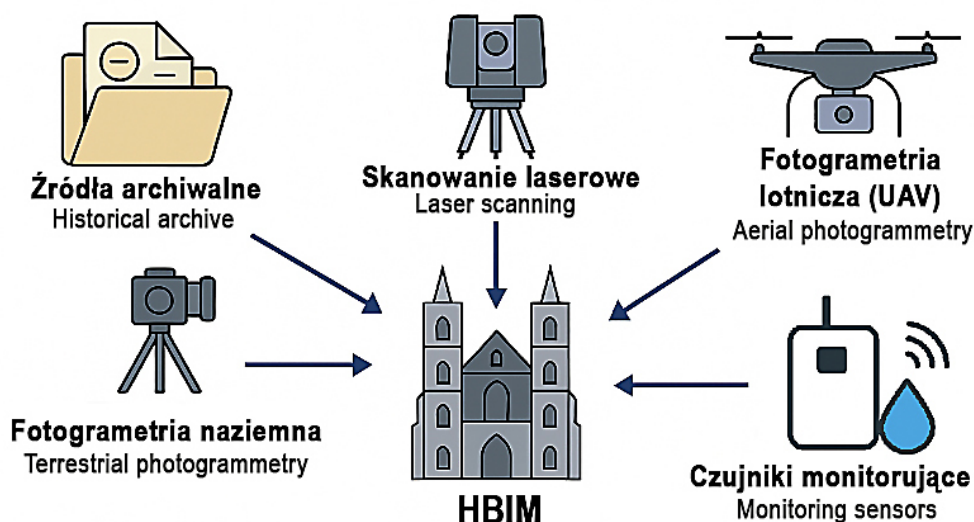
Quality assurance is founded on clearly defined technical requirements, including coverage rate, point density, registration RMS error, GSD, and metadata completeness, as well as routine QA/QC procedures used to verify the quality of survey data and models before approval. Defining quality criteria at an early project stage reduces the need for repeated surveys and facilitates the integration of multisensor datasets into HBIM models [Penjor et al. 2024; Bruno, Roncella 2019].

Wymiar	Typowy parametr lub wskaźnik	Cel
Wskaźnik pokrycia	Procent powierzchni udokumentowanych za pomocą TLS i fotogrametrię zgodnie z kryteriami jakości	Zapewnia kompletność na potrzeby modelowania i mapowania stanu.
Błąd RMS rejestracji skanów	Wartość RMS po wyrównaniu skanów TLS (na etapie rejestracji stanowisk)	Weryfikuje spójność geometryczną zbiorów TLS dla integracji z HBIM.
Terenowy rozmiar piksela (GSD)	Wielkość piksela w ortofotoplanach	Potwierdza jakość metryczną dla mapowania degradacji i analiz porównawczych.
Gęstość punktów	Liczba punktów na metr kwadratowy w danych TLS (mierzona w strefach referencyjnych)	Zapewnia odpowiedni poziom szczegółowości odwzorowania sklepień, węzłów konstrukcyjnych i innych elementów wymagających wysokiej rozdzielczości.
Kompletność metadanych	Odsetek uzupełnionych wymaganych pól metadanych dla elementów i obiektów	Zapewnia spójny opis elementów i ułatwia wymianę danych w HBIM.
Stabilność ekspozycji i oświetlenia (fotogrametria)	Równomierne oświetlenie, brak prześwieleń i nadmiernych odbić	Zapewnia powtarzalną jakość odwzorowania detalu powierzchni i ogranicza artefakty.
Kontrola wersji i zapisy audytowe (CDE)	Zgodność z zasadami wersjonowania oraz pełna dokumentacja akceptacji i przekazania w CDE	Zapewnia udokumentowany przebieg pracy z danymi i umożliwia audyt na każdym etapie projektu.

Tab. 2. Parametry pozyskiwania danych i wskaźniki jakości

Dimension	Typical Parameter or Indicator	Purpose
Coverage Rate	Percentage of surfaces documented using TLS and photogrammetry in accordance with the established quality criteria	Ensures completeness for modelling and condition mapping purposes.
Scan Registration RMS Error	RMS value obtained after TLS scan alignment and registration	Verifies the geometric consistency of TLS datasets intended for HBIM integration.
Ground Sampling Distance (GSD)	Pixel size represented in orthophotos	Confirms metric quality for degradation mapping and comparative analyses.
Point Density	Number of points per square meter in TLS datasets (measured in reference areas)	Ensures a sufficient level of detail for representing vaults, structural joints, and other features requiring high resolution.
Metadata Completeness	Percentage of required metadata fields completed for elements and objects	Ensures consistent component descriptions and facilitates data exchange within HBIM environments.
Exposure and Lighting Stability (Photogrammetry)	Uniform illumination, absence of overexposure, and minimization of excessive reflections	Ensures consistent representation of surface details and reduces image artefacts.
Version Control and Audit Records (CDE)	Compliance with versioning procedures and complete documentation of approvals and information exchanges within the CDE	Ensures a documented information workflow and enables auditing throughout all project stages.

Table 2. Data acquisition parameters and quality indicators



Ryc. 4. HBIM jako centrum integracji danych pomiarowych, sensorowych i archiwalnych; oprac. własne

Fig. 4. HBIM as an integration hub for survey, sensor, and archival data; original work

Odrębne zestawienie parametrów pozyskiwania danych i wskaźników jakości przedstawiono w tabeli 2, porządkując wymagania dla TLS, fotogrametrii i integracji HBIM oraz wskazując wartości niezbędne do uzyskania danych spełniających kryteria projektu.

Zarządzanie projektem, logistyka i etyka

Zarządzanie projektem w dokumentacji dziedzictwa obejmuje skoordynowane działania organizacyjne, logistyczne oraz etycznoprawne, które bezpośrednio wpływają na jakość danych i efektywność procesu. Kluczowe znaczenie ma odpowiednie zaplanowanie dostępu do obiektu, organizacja pracy zespołu oraz zapewnienie stabilnych warunków rejestracji (oświetlenie, ustawienie stanowisk, bezpieczeństwo pracy), co ogranicza liczbę powtórzeń ujęć i ryzyko wystąpienia błędów [Fassi et al. 2010; Taileb et al. 2023].

Aspekty etyczne i prawne obejmują uzgodnienia z parafiami i zarządcami obiektów, w tym zgody na pozyskiwanie i publikację danych, zasady udostępniania materiałów oraz uregulowanie praw do ich wykorzystania i publikacji. Przyjęte protokoły określają sposób pracy w przestrzeniach sakralnych, a metadane przygotowane w językach polskim, górnołużyckim i niemieckim wspierają dostępność wyników w kontekstach transgranicznych [Penjor et al. 2024; Kuroczyński, Argasiński 2025].

Logistyka informacji obejmuje także organizację pracy w CDE, wersjonowanie oraz dokumentowanie przebiegu procesu, co umożliwi audyt na każdym etapie i zapewnia spójność z modelem zarządzania przedstawionym w rozdziale 4.3. Rycina 4 ilustruje integrację wieloźródłowych danych pomiarowych i archiwalnych w środowisku HBIM.

A separate overview of data acquisition parameters and quality indicators is provided in table 2. This table organizes the requirements for TLS, photogrammetry, and HBIM integration, while identifying the values necessary to obtain datasets that satisfy project objectives and quality criteria.

Project management, logistics and ethics

Project management in heritage documentation encompasses coordinated organizational, logistical, ethical, and legal activities that directly affect both data quality and process efficiency. Particular importance is attached to planning access to heritage sites, organizing field teams, and ensuring stable acquisition conditions, including lighting, station positioning, and operational safety. These measures reduce the need for repeated surveys and minimize the risk of data acquisition errors [Fassi et al. 2010; Taileb et al. 2023].

Ethical and legal considerations include agreements with parishes and site managers concerning data acquisition and publication permissions, rules governing data dissemination, and regulations related to data ownership, use, and publication rights. The adopted protocols define procedures for working within religious spaces, while metadata prepared in Polish, Upper Sorbian, and German enhance accessibility in cross-border heritage contexts [Penjor et al. 2024; Kuroczyński, Argasiński 2025].

Information logistics also encompasses workflow organization within the CDE, version control, and documentation of project activities, enabling auditing at every stage and ensuring consistency with the management model presented in section 4.3. Figure 4 illustrates the integration of survey and archival data from multiple sources within an HBIM environment.

Uwarunkowania obiektów i parametry dokumentacji

W regionie występują kościoły halowe, bazylikowe oraz obiekty o konstrukcji drewnianej i mieszanej, różniące się skalą, dostępnością pomiarową i stanem zachowania. Różnorodność tę uwzględniono przy formułowaniu parametrów pomiarowych i zakresów HBIM przedstawionych w tabeli 3. W tabeli podsumowano minimalne wymagania dla TLS i fotogrametrii, m.in. dotyczące błędu RMS, GSD, wskaźnika pokrycia oraz zakresów modelowania HBIM, które stanowią podstawę do planowania dokumentacji i późniejszych kontroli jakości.

Pełna wersja tabeli rozszerza ten zestaw o pola dotyczące konserwacji (wyniki/wyjścia), interesariuszy i zgód, pakietów publikacyjnych w CDE, interpretacji i ponownego użycia danych, a także dostępu i zagrożeń – tak, aby ująć cały cykl informacji od pozyskania po eksploatację i monitoring [Wojciechowska et al. 2024].

Wyniki i dyskusja

Rozdział syntetyzuje wnioski oparte na dostępnych źródłach, doświadczeniach praktycznych zespołu oraz założeniach projektowanego systemu i analizuje, w jaki sposób jakość techniczna dokumentacji, praktyki zarządcze oraz zapewnienie jakości (QA/QC) wzajemnie na siebie oddziałują. Nie ograniczono się jedynie do wskazania dokładności geometrycznej czy kompletności modeli – przeanalizowano również, w jaki sposób uporządkowane procesy projektowe i zarządzanie informacją wpływają na wyniki w odmiennych układach i uwarunkowaniach obiektów. Poprzez ocenę jakości danych, skuteczności zarządzania, udziału interesariuszy oraz gotowości do konserwacji zapobiegawczej zidentyfikowano zarówno mocne strony metodyki, jak i jej ograniczenia. Wskazano również powtarzalne wzorce, które przekładają się na praktyczne rekomendacje dla przyszłych przedsięwzięć związanych z digitalizacją dziedzictwa. W kolejnych podrozdziałach przedstawiono te wnioski w szczegółach, rozpoczynając od oceny jakości i kompletności dokumentacji.

Jakość dokumentacji, kompletność i zarządzanie

Hybrydowe pozyskiwanie danych zapewnia wysoką jakość i kompletność dokumentacji, dlatego w dalszej części oceniono, jak organizacja pracy i zarządzanie informacją wpływają na uzyskiwane wyniki. Jakość danych jest bezpośrednio zależna od sposobu planowania i obiegu informacji. Traktowanie dokumentacji jako projektu (z jasno określonym zakresem, harmonogramem i zasadami zarządzania ryzykiem) ułatwia współpracę parafii, konserwatorów i instytucji publicznych. Wspólne środowisko danych (CDE) z kontrolą wersji i formalnymi procedurami akcepta-

Building characteristics and documentation parameters

The study area includes hall churches, basilicas, and buildings of timber or mixed construction, differing in scale, survey accessibility, and state of preservation. This diversity was taken into account when formulating the survey parameters and HBIM scopes presented in table 3. The table summarizes the minimum requirements for TLS and photogrammetry, including RMS error, GSD, coverage rate, and HBIM modelling scope. These parameters provide a basis for documentation planning and subsequent quality control procedures.

The full version of the table extends this framework by including fields related to conservation outputs, stakeholders and permissions, publication packages within the CDE, data interpretation and reuse, as well as access restrictions and risk factors. In this way, the entire information lifecycle is addressed, spanning data acquisition, operational use, and long-term monitoring [Wojciechowska et al. 2024].

Results and discussion

This section synthesizes findings derived from the available literature, the practical experience of the research team, and the assumptions underlying the proposed system. It examines the interactions between technical documentation quality, management practices, and quality assurance procedures (QA/QC). The discussion extends beyond geometric accuracy and model completeness, analyzing how structured project workflows and information management influence outcomes across different building types and documentation conditions. Through the evaluation of data quality, management effectiveness, stakeholder involvement, and preparedness for preventive conservation, both the strengths and limitations of the proposed methodology were identified. Recurrent patterns observed during the analysis were translated into practical recommendations for future heritage digitization projects. The following subsections present these findings in greater detail, beginning with an assessment of documentation quality and completeness.

Documentation quality, completeness and management

Hybrid data acquisition provides a high level of documentation quality and completeness. The following discussion therefore evaluates how work organization and information management influence project outcomes. Data quality is directly dependent on planning procedures and information flow. Treating documentation as a project, with a clearly defined scope, schedule, and risk management framework, facilitates cooperation between parishes, conservation professionals, and public institutions. A Common Data Environment (CDE), supported by version control and formal ap-

Obiekt	Lokalizacja	Status	Potencjał adaptacji	Metoda (wg stanu)	Pomiar (makro/mezo/mikro)	QA/QC (AC)	HBIM (klasy)
Dawny kościół ewangelicki	Żeliszów k. Bolesławca	Zabezpieczony; wydarzenia kulturalne	Wysoki	Dostępny → TLS + CRP; UAV (dach/ wieża/foto- czenie)	Makro: UAV 5–10 mm/pix Mezo: TLS ≥70 pts/m² Mikro: CRP 1–2 mm/pix	RMS: 5–7 mm GSD: 5–10 mm / 1–2 mm Pokrycie ≥95% Metadane ≥95%	vw, rb, rsp, gb, ws, rf, tj (cr, sa, int)
Kościół katolicki	Rapocin k. Głogowa	Ruina	Niski/średni	Wysokie ryzyko → UAV + TLS (bez wnętrza)	Makro: UAV 5–8 mm/pix Mezo: TLS long-range Mikro: —	RMS: 8–10 mm GSD: 5–8 mm Pokrycie ≥90% Metadane ≥90%	ws, gr, cf, vc, cz (hum, bio)
Dawny kościół ewangelicki	Piersno	Nieużytkowany	Średni	Niedostępny → CRP (elewacje); UAV (dach)	Makro: UAV (opcj. 5–10 mm/pix Mezo: TLS ≥60 pts/m² Mikro: CRP 2–3 mm/pix	RMS: 5–7 mm GSD: 2–3 mm Pokrycie ≥95% Metadane ≥95%	vc, ns, rt, tj, df, pl (hum, bio)
Kościół graniczny/ ucieczkowy (parafia św. Antoniego)	Biedrzychowie (pas Kwisy)	Czynny (liturgia)	Wysoki	Dostępny → TLS + CRP (empory/organy); UAV (dach/wieża/ otoczenie)	Makro: UAV opcj. 5–10 mm/pix Mezo: TLS ≥70 pts/m² Mikro: CRP 1–2 mm/pix	RMS: 5–6 mm GSD: 1–2 mm / 5–10 mm Pokrycie ≥95% Metadane ≥95%	gb, oc, pf, pb, rt, ws, vw (hum, cr, sa)
Kościół graniczny/ ucieczkowy (ruina wieży)	Pobiedna (pas Kwisy)	Ruina	Niski	Wysokie ryzyko → UAV + TLS (bez wnętrza)	Makro: UAV 5–8 mm/pix Mezo: TLS long-range Mikro: —	RMS: 8–10 mm GSD: 5–8 mm Pokrycie ≥90% Metadane ≥90%	ts, cz, cf, vc, li (hum, bio)
Dawny kościół ewangelicki	Zawonia	Sala widowiskowo- rekreacyjna	Wysoki	Dostępny → TLS/CRP; UAV (dach/otoczenie)	Makro: UAV 5–10 mm/pix Mezo: TLS ≥50 pts/m² Mikro: CRP 2 mm/pix	RMS: 6–7 mm GSD: 2–3 mm Pokrycie ≥95% Metadane ≥95%	hf, sp, ws, rt (int)

Tab. 3. Zestaw kluczowych parametrów pozyskiwania danych i jakości oraz zakresów HBIM (wersja skrócona)

Legenda

TLS – nazimenny skaning laserowy; CRP – fotogrametria z bliskiego zasięgu; UAV – fotogrametria dronem
 QA/QC: RMS – błąd rejestracji; GSD – terenowy rozmiar piksela; cov – pokrycie; meta – kompletność metadanych
 HBIM klasy: vw=vault_web; rb=rib; rsp=respond; gb=gallery_bay; oc=organ_case; pf=pipeline_fields;
 trc=tracery; ws=wall_segment; gr=gable_rennant; cf=crack_feature; vc=vegetation_cover;
 ts=tower_shell; cz=collapse_zones; hf=heritage_vs_fit_out; li=lapidarium_items; ns=have_shell; rt=roof_truss_member;
 tj=timber_joint; df=door_frame; pl=plaster_layer; pb=pcw_block; tr=tie_rod;
 sp=services/partitions
 Arybuty stanu: cr=pęknięcia; sa=wysolenia; int=intervencje; hum=wilgoć; bio=biokorozja



Object	Location	Status	Adaptive Reuse Potential	Method (based on condition)	Survey scale (macro/meso/micro)	QA/QC (AC)	HBIM classes
Former Protestant church	Żeliszów near Bolesławiec	Secured; cultural events	High	Accessible → TLS + CRP; UAV (roof/tower/surroundings)	Macro: UAV 5–10 mm/pix Meso: TLS ≥70 pts/m² Micro: CRP 1–2 mm/pix	RMS: 5–7 mm GSD: 5–10 mm / 1–2 mm Coverage ≥95% Metadata ≥95%	vw, rb, rsp, gb, ws, rf, tj (cr, sa, int)
Catholic church	Rapocin near Głogów	Ruin	Low/medium	High risk → UAV + TLS (no interior access)	Macro: UAV 5–8 mm/pix Meso: TLS long-range Micro: —	RMS: 8–10 mm GSD: 5–8 mm Coverage ≥90% Metadata ≥90%	ws, gr, cf, vc, cz (hum, bio)
Former Protestant church	Piersno	Unused	Medium	Inaccessible → CRP (façades); UAV (roof)	Macro: UAV (opcj. 5–10 mm/pix Meso: TLS ≥60 pts/m² Micro: CRP 2–3 mm/pix	RMS: 5–7 mm GSD: 2–3 mm Coverage ≥95% Metadata ≥95%	vc, ns, rt, tj, df, pl (hum, bio)
Border / Refuge Church (St Anthony Parish)	Biedrzychowice (Kwisa River zone)	Active (liturgical use)	High	Accessible → TLS + CRP (galleries/organs); UAV (roof/tower/surroundings)	Macro: UAV opcj. 5–10 mm/pix Meso: TLS ≥70 pts/m² Micro: CRP 1–2 mm/pix	RMS: 5–6 mm GSD: 1–2 mm / 5–10 mm Coverage ≥95% Metadata ≥95%	gb, oc, pf, pb, rt, ws, vw (hum, cr, sa)
Border / Refuge Church (tower ruin)	Pobiedna (Kwisa River zone)	Ruin	Low	High risk → UAV + TLS (no interior access)	Macro: UAV 5–8 mm/pix Meso: TLS long-range Micro: —	RMS: 8–10 mm GSD: 5–8 mm Coverage ≥90% Metadata ≥90%	ts, cz, cf, vc, li (hum, bio)
Former Protestant church	Zawonia	Cultural and recreational hall	High	Accessible → TLS / CRP; UAV (roof/surroundings)	Macro: UAV 5–10 mm/pix Meso: TLS ≥50 pts/m² Micro: CRP 2 mm/pix	RMS: 6–7 mm GSD: 2–3 mm Coverage ≥95% Metadata ≥95%	hf, sp, ws, rt (int)

Table 3. Summary of key data acquisition and quality parameters as well as HBIM modelling scopes (abridged version)

Legend

TLS – Terrestrial Laser Scanning; CRP – Close-Range Photogrammetry; UAV – drone-based photogrammetry.

QA/QC: RMS – registration error; GSD – Ground Sampling Distance; Coverage – documented surface coverage; Metadata – metadata completeness.

HBIM classes: vw=vault_web; rb=rib; rsp=respond; gb=gallery_bay; oc=organ_case; pf=pipe_fields; trc=tracery;

ws=wall_segment; gr=gable_remnant; cf=crack_feature; vc=vegetation_cover;

ts=tower_shell; cz=collapse_zones; hf=heritage_vs_fit_out; li=lapidarium_items; ns=nave_shell; rt=roof_truss_member;

tj=timber_joint; df=door_frame; pl=plaster_layer; pb=pew_block; tr=tie_rod;

sp=services/partitions

Condition attributes: cr=pęknięcia; sa=wysolenia; int=interwencje; hum=wilgoć; bio=biokorozja

cji ogranicza konieczność ponownego pozyskiwania danych i korekty modeli, a role i odpowiedzialność za aktualizacje oraz przeglądy są jednoznacznie przypisane. Zmiany zakresu prac i zasad dostępu przechodzą przez udokumentowane procedury, co minimalizuje zakłócenia w pracach terenowych i przetwarzaniu. Takie podejście jest zgodne z wnioskami płynącymi z literatury dotyczącej HBIM i skutecznych wdrożeń tego typu rozwiązań [Kuroczyński, Argasiński 2025; Penjor et al. 2024].

Struktura podziału prac (WBS), harmonogram i budżet porządkują kolejność zadań – od pozyskania danych przez integrację w HBIM po uzupełnianie metadanych – co usprawnia raportowanie postępu i skracają cykle akceptacji. Jeśli kryteria jakości, takie jak pokrycie, gęstość punktów, błąd RMS, GSD czy kompletność metadanych, są jasno określone od początku i widoczne dla stron, zmienność kluczowych wskaźników ulega zmniejszeniu, a spójność danych wejściowych do modelowania wzrasta [Penjor et al. 2024; Alshawabkeh et al. 2024; Wojciechowska et al. 2024].

Podsumowując, połączenie wysokiej jakości technicznej z uporządkowanym zarządzaniem informacją i projektem daje wyniki dokładne, kompletne, sprawdzalne i udokumentowane, a zarazem interoperacyjne i użyteczne w procesie konserwacji zapobiegawczej.

Zapewnienie jakości, logistyka i wnioski porównawcze

Stosowanie przejrzystych procedur jakości (QA/QC), przemyślane planowanie działań oraz porównywanie wyników uzyskiwanych dla różnych układów obiektów pozwala uzyskać rezultaty powtarzalne i wiarygodne. Plany jakości definiują wymagania techniczne dla wskaźnika pokrycia, gęstości punktów, błędu RMS rejestracji skanów, GSD oraz kompletności metadanych, a kontrole QC i audyty weryfikują ich spełnienie. Takie podejście zmniejsza liczbę powtórzeń pomiarów i korekt modeli oraz poprawia interoperacyjność danych wykorzystywanych w HBIM [Alshawabkeh et al. 2024; Penjor et al. 2024; Kuroczyński, Argasiński 2025].

Logistyka ma bezpośredni wpływ na jakość dokumentacji. Odpowiednia kolejność sesji TLS i dobór pory dnia do wykonywania zdjęć fotogrametrycznych redukują zasłonięcia i artefakty. Spójne zasady przechowywania danych, wykonywania kopii zapasowych i wersjonowania stabilizują pracę z dużymi chmurami punktów, a metadane przygotowane w wymaganych językach oraz wczesne uzgodnienia z interesariuszami zwiększają dostępność i akceptację wyników [Chen et al. 2025; Alshawabkeh et al. 2024].

Porównania między typologiami obiektów wskazują odmienne wymagania dokumentacyjne i różną wrażliwość na błędy pomiarowe:

- kościoły murowane ze skomplikowanymi sklepieniami i bogatym detalem architektonicznym wymagają precyzyjnego planowania stanowisk TLS,

proval procedures, reduces the need for repeated data acquisition and model corrections, while roles and responsibilities for updates and reviews remain clearly assigned. Changes in project scope and access conditions are processed through documented procedures, minimizing disruptions to fieldwork and data processing activities. This approach is consistent with conclusions presented in the HBIM literature and documented implementation experiences [Kuroczyński, Argasiński 2025; Penjor et al. 2024].

The Work Breakdown Structure (WBS), project schedule, and budget establish a logical sequence of tasks, from data acquisition and HBIM integration to metadata enrichment, thereby improving progress reporting and shortening approval cycles. When quality criteria, such as coverage rate, point density, RMS error, GSD, and metadata completeness, are defined from the outset and communicated to all parties involved, the variability of key indicators decreases and the consistency of modelling inputs improves [Penjor et al. 2024; Alshawabkeh et al. 2024; Wojciechowska et al. 2024].

In summary, the combination of high technical quality with structured information and project management produces results that are accurate, complete, verifiable, and well documented, while remaining interoperable and suitable for preventive conservation applications.

Quality assurance, logistics and comparative findings

The application of transparent quality procedures (QA/QC), careful operational planning, and the comparison of results obtained from different building typologies enable the achievement of reliable and repeatable outcomes. Quality plans define technical requirements for coverage rate, point density, scan registration RMS error, GSD, and metadata completeness, while QC inspections and audits verify compliance with these requirements. Such an approach reduces the need for repeated surveys and model revisions and improves the interoperability of information incorporated into HBIM environments [Alshawabkeh et al. 2024; Penjor et al. 2024; Kuroczyński, Argasiński 2025].

Logistics has a direct influence on documentation quality. Appropriate sequencing of TLS sessions and the selection of suitable times of day for photogrammetric image acquisition reduce occlusions and image artefacts. Consistent procedures for data storage, backup creation, and version control stabilize the management of large point-cloud datasets, while metadata prepared in the required languages, together with early stakeholder engagement, improve accessibility and acceptance of project outcomes [Chen et al. 2025; Alshawabkeh et al. 2024].

Comparisons between building typologies reveal distinct documentation requirements and varying sensitivities to measurement errors:

- masonry churches featuring complex vaulting systems and rich architectural ornamentation require precise planning of TLS scan positions, control of

kontroli refleksów oraz doboru GSD odpowiednio do zamierzonych ortofotoplanów;

- kościoły drewniane wymagają wielokierunkowych ujęć w strefach węzłów konstrukcyjnych oraz ostrożnego filtrowania chmur punktów, tak aby zachować drobne krzywizny będące wskaźnikami deformacji konstrukcji, a także prowadzenia monitoringu środowiskowego;
- obiekty o konstrukcji mieszanej wymagają zastosowania powyższych działań, ze szczególnym uwzględnieniem stref styku konstrukcji murowanej i drewnianej.

Niezależnie od typu obiektu kluczowe znaczenie mają elementy stabilizujące (np. ściągi) oraz warunki środowiskowe, które powinny być systematycznie ewidencjonowane w HBIM, z uwzględnieniem ich lokalizacji, stanu oraz dat inspekcji. Regularny monitoring, obejmujący powtarzane skany, fotografie oraz analizy „przed-po”, pozwala wcześniej identyfikować zmiany i planować działania zapobiegawcze. Minimalne wymagania dotyczące pokrycia, gęstości punktów, RMS, GSD i kompletności metadanych wiążą się bezpośrednio z klasami elementów takimi jak pola sklepień, żebra, więźba czy złącza ciesielskie. Niespełnienie progów jakości uruchamia działania korygujące, takie jak zwiększenie gęstości zdjęć lub uzupełnienie pomiarów.

Zintegrowana ścieżka od skanu do modelu HBIM pozostaje adaptowalna do różnych typów obiektów, a literatura podkreśla, że skuteczność metodyki wzrasta, gdy biblioteki elementów i struktury metadanych są dostosowane do lokalnych uwarunkowań [Alshawabkeh et al. 2024; Chen et al. 2025; Bruno, Roncella 2018]. W wypadku obiektów drewnianych interpretacja węzłów ciesielskich wymaga połączenia procedur automatycznych z oceną ekspercką, aby zachować diagnostyczną wartość dokumentacji [Kantorowicz 2023; Penjor et al. 2024].

Model Cyfrowego Zarządzania Projektem dla Dziedzictwa

Model Cyfrowego Zarządzania Projektem dla Dziedzictwa porządkuje koordynację działań technicznych, organizacyjnych i jakościowych w dokumentacji wybranych obiektów sakralnych Śląska i Górnych Łużyc. Najlepsze efekty uzyskuje się, gdy wielosensorowe pozyskiwanie danych (TLS, fotogrametria) jest powiązane z uporządkowanym obiegiem informacji w CDE oraz spójnymi procedurami jakości (QA/QC) [Penjor et al. 2024; Alshawabkeh et al. 2024]. Model przekłada te założenia na czytelną strukturę integrującą pozyskiwanie danych, modelowanie, logistykę oraz współpracę z interesariuszami [Kuroczyński, Argasiński 2025].

Tabela 4 syntetyzuje Model Cyfrowego Zarządzania Projektem dla Dziedzictwa, ujmując pięć współzależnych warstw: techniczną, zarządzania, jakości, logistyki i interesariuszy wraz z ich celami, działaniami, wskaź-

reflective surfaces, and the selection of GSD values appropriate for the intended orthophoto products;

- timber churches require multi-directional image acquisition in structural joint zones, together with careful filtering of point clouds to preserve subtle curvatures indicative of structural deformation, as well as continuous environmental monitoring;
- buildings of mixed construction require the application of the above measures, with particular attention given to the transition zones between masonry and timber structural components.

Regardless of building type, stabilizing structural elements, such as tie rods, and environmental conditions remain key factors that should be systematically recorded within HBIM environments, including their location, condition, and inspection dates. Regular monitoring based on repeated scans, photographic surveys, and before-and-after analyses enables the early identification of changes and supports preventive interventions. Minimum requirements relating to coverage, point density, RMS error, GSD, and metadata completeness are directly associated with classes of components such as vault surfaces, ribs, roof structures, and timber joints. Failure to meet quality thresholds triggers corrective actions, including increased image density or supplementary surveying campaigns.

The integrated scan-to-HBIM workflow remains adaptable to different building types, while the literature emphasizes that methodological effectiveness increases when element libraries and metadata structures are adjusted to local conditions [Alshawabkeh et al. 2024; Chen et al. 2025; Bruno, Roncella 2018]. In the case of timber structures, the interpretation of carpentry joints requires a combination of automated procedures and expert assessment in order to preserve the diagnostic value of the documentation [Kantorowicz 2023; Penjor et al. 2024].

Digital Heritage Project Management Model

The Digital Heritage Project Management Model structures the coordination of technical, organizational, and quality-related activities involved in the documentation of selected religious heritage sites in Silesia and Upper Lusatia. The most effective results are achieved when multi-sensor data acquisition methods, including TLS and photogrammetry, are linked to a structured information workflow within a Common Data Environment (CDE) and supported by consistent quality procedures (QA/QC) [Penjor et al. 2024; Alshawabkeh et al. 2024]. The model translates these principles into a coherent framework integrating data acquisition, modelling, logistics, and stakeholder engagement [Kuroczyński, Argasiński 2025].

Table 4 summarizes the Digital Heritage Project Management Model by presenting five interrelated layers: technical, management, quality, logistics, and stakeholder management, together with their objectives, activities, indicators, and outputs. The implementation of the model is based on linking each project

nikami i rezultatami. Wdrożenie modelu opiera się na powiązaniu każdej fazy projektu z jasno określonymi rezultatami i punktami kontroli jakości. Na etapie rozpoczęcia określa się zakres i cele projektu, przydziela role i odpowiedzialność oraz definiuje mierzalne cele jakościowe w obszarach dokładności, kompletności i użyteczności interpretacyjnej. Planowanie obejmuje opracowanie koncepcji pozyskiwania danych i planu zarządzania informacją, harmonogram prac terenowych, działania ograniczające ryzyko (np. zasłonięcia, odbicia czy ograniczony dostęp) oraz uzgodnienie schematu metadanych (w projektach transgranicznych np. w języku polskim, górnołużyckim i niemieckim). W fazie realizacji prowadzi się pozyskiwanie i przetwarzanie zgodnie z udokumentowanymi procedurami, przygotowuje raporty z rejestracji skanów TLS i dopasowania układu zdjęć oraz uzupełnia model HBIM o opisane semantycznie komponenty. Monitorowanie i kontrola polegają na porównywaniu czasu i kosztów z bazami odniesienia, weryfikacji wskaźników jakości, wdrażaniu działań korygujących w razie niezgodności oraz obsłudze zmian w CDE. Etap zamknięcia obejmuje potwierdzenie spełnienia wymagań jakościowych, uporządkowanie wniosków z realizacji oraz ustalenie zasad archiwizacji i dostępu do wyników, wraz z uregulowaniem praw do danych.

Centralnym elementem modelu pozostaje zarządzanie jakością. Kryteria jakości, takie jak pokrycie, gęstość, RMS, GSD oraz kompletność metadanych, należy raportować na każdym etapie – zarówno podczas pozyskiwania danych, jak i modelowania HBIM oraz przygotowywania ortofotoplanów. Pełny zapis przeglądów i zatwierdzeń w CDE umożliwia prześledzenie procesu podejmowania decyzji i wspiera późniejsze wykorzystanie danych, zgodnie z zaleceniami literatury [Penjor et al. 2024; Bruno, Roncella 2018].

Logistyka stanowi zaplecze jakości technicznej. Obejmuje dobór pory dnia do wykonania fotografii, rozmieszczenie stanowisk pomiarowych, ustalone zasady przechowywania danych, kontrolę wersji i wykonywanie kopii zapasowych. Działania te chronią przed utratą danych i stabilizują pracę z dużymi zbiorami, co ma kluczowe znaczenie w projektach obejmujących wiele obiektów o zróżnicowanych warunkach dokumentacyjnych [Chen et al. 2025; Fassi et al. 2010].

Warstwa interesariuszy obejmuje jasny podział ról, regularne przeglądy robocze oraz przygotowanie metadanych w językach polskim, górnołużyckim i niemieckim. Uwzględnienie wielojęzyczności zwiększa dostępność wyników oraz wspiera integrację społeczności lokalnych z procesem dokumentacyjnym.

Model ogranicza konieczność powtórnego pozyskiwania danych, zmniejsza liczbę korekt modeli i zwiększa przewidywalność przebiegu prac. Zgodnie z literaturą największe korzyści wynikają z połączenia spójnego obiegu informacji, jasno określonych procedur jakości oraz regularnych przeglądów, co wzmacnia interoperacyjność i zaufanie interesariuszy.

phase with clearly defined deliverables and quality control checkpoints. During the initiation phase, project scope and objectives are defined, roles and responsibilities are assigned, and measurable quality objectives related to accuracy, completeness, and interpretative usefulness are established. The planning phase includes the preparation of the data acquisition strategy and information management plan, scheduling of fieldwork, implementation of risk mitigation measures (e.g. addressing occlusions, reflections, or restricted access), and the definition of a metadata framework (for cross-border projects, for example, in Polish, Upper Sorbian, and German). During project execution, data acquisition and processing are carried out according to documented procedures, reports on TLS registration and image alignment are prepared, and the HBIM model is enriched with semantically defined components. Monitoring and control activities involve comparing schedule and cost performance against baseline values, verifying quality indicators, implementing corrective measures in the event of non-conformities, and managing project changes within the CDE. The closing phase includes confirming compliance with quality requirements, consolidating lessons learned, defining archiving and access procedures, and establishing arrangements regarding data ownership and reuse rights.

Quality management remains the central element of the model. Quality criteria such as coverage rate, point density, RMS error, GSD, and metadata completeness should be reported throughout all project stages, including data acquisition, HBIM modelling, and orthophoto production. Comprehensive records of reviews and approvals maintained within the CDE provide traceability of decision-making processes and support future data use, in accordance with recommendations presented in the literature [Penjor et al. 2024; Bruno, Roncella 2018].

Logistics forms the operational foundation of technical quality. It includes selecting appropriate times for image acquisition, planning survey station locations, implementing data-storage procedures, maintaining version control, and performing regular backups. These activities reduce the risk of data loss and support the stable processing of large datasets, which is particularly important in projects involving multiple heritage assets under varying documentation conditions [Chen et al. 2025; Fassi et al. 2010].

The stakeholder layer incorporates clear role allocation, regular project reviews, and the preparation of metadata in Polish, Upper Sorbian, and German. The inclusion of multilingual information improves accessibility and supports the involvement of local communities in the documentation process.

The model reduces the need for repeated data acquisition, minimizes model revisions, and improves the predictability of project execution. The literature indicates that the greatest benefits arise from the combination of a consistent information workflow, clearly defined quality procedures, and regular review processes, which collec-

Warstwa	Cele główne	Kluczowe działania	Wskaźniki jakości	Narzędzia podstawowe	Główne rezultaty
Techniczna	Dokładne pozyskiwanie geometrii i informacji o powierzchni, spójna integracja danych w HBIM	TLS: plan rozmieszczenia stanowisk, rejestracja i raport błędu RMS Fotogrametria: plan serii zdjęć, dopasowanie układu zdjęć, ortofotoplany o własnościach metrycznych Integracja: klasy elementów HBIM i powiązania z dokumentacją obrazową	Wskaźnik pokrycia, gęstość punktów, błąd RMS, GSD, wyniki list kontrolnych klasyfikacji HBIM	Oprogramowanie TLS i fotogrametryczne, edytory chmur punktów, środowisko HBIM	Zarejestrowane chmury punktów, dopasowane serie zdjęć, metryczne ortofotoplany, komponenty HBIM z opisem semantycznym
Zarządzanie	Przewidywalna realizacja, kontrola ryzyk i zmian	Planowanie faz (WBS, harmonogram, budżet), rejestry ryzyk i zmian, raporty postępu	Dotrzymanie harmonogramu, odchylenia kosztów, status ryzyk, sprawność obsługi zmian	Narzędzia harmonogramowania, rejestry zadań, CDE	Zatwierdzone plany, rejestry ryzyk i zmian, raporty statusowe, decyzje w CDE
Jakość	Stale zapewnienie i kontrola jakości, dokumentowane przeglądy	Plan QA, testy QC, audyty, weryfikacja ortofotoplanów i HBIM, działania korygujące, zatwierdzenia w CDE	Spełnienie progów jakości (pokrycie, gęstość, RMS, GSD, kompletność metadanych), zamykanie niezgodności, kompletność zapisów	Listy kontrolne QA, narzędzia weryfikacji, proces zatwierdzeń w CDE	Plan QA, raporty QC, dzienniki audytowe, protokoły zatwierdzeń
Logistyka	Bezpieczna i efektywna praca w terenie, stabilna infrastruktura danych	Planowanie dostępu, bezpieczeństwo i procedury sprzętowe, kopie zapasowe, kontrola wersji, zasady przechowywania	Powtórki ujęć, incydenty BHP, czas odtworzenia danych, integralność wersji	Procedury BHP, platformy składowania, systemy wersjonowania	Plan logistyki, dzienniki BHP, rejestry składowania i kopii, historia wersji
Interesariusze	Jasny podział ról, udział społeczności, wielojęzyczna dokumentacja	Określenie ról, przeglądy robocze, metadane (PL–HSB–DE), zatwierdzenia w CDE	Skuteczność przeglądów, wdrożenie uwag, kompletność metadanych	Słowniki i szablony, przepływy zatwierdzeń w CDE, protokoły konsultacji	Rejestr interesariuszy, protokoły przeglądów, metadane wielojęzyczne, pakiety publikacyjne

Tab. 4. Macierz Modelu Cyfrowego Zarządzania Projektem dla Dziedzictwa

Wymiar wyników	Wskaźnik	Co raportować	Typowa metoda	Miejsce przechowywania
Jakość dokumentacji	Błąd RMS rejestracji skanów, GSD, wskaźnik pokrycia	Wartości RMS, GSD ortofotoplanów, procent powierzchni ujętych zgodnie z kryteriami jakości	Raport TLS, raport dopasowania zdjęć, ocena pokrycia i widoczności	CDE → folder QA/QC → raporty pomiarowe
Integralność modelu HBIM	Kompletność klasyfikacji elementów, spójność identyfikatorów	Procent elementów przypisanych do właściwych klas HBIM, wyniki kontroli identyfikatorów elementów	Skrypt walidacyjny HBIM, lista kontrolna klasyfikacji	CDE → repozytorium modelu → walidacje HBIM
Realizacja projektu	Realizacja harmonogramu, odchylenie kosztów, status ryzyk i zmian	Plan vs. wykonanie (harmonogram), różnica budżetowa, liczba i status wpisów w rejestrach	Pulpit projektu, raport wartości wypracowanej (EVM), rejestry ryzyk i zmian	CDE → przestrzeń projektu → raporty statusowe
Zaangażowanie interesariuszy	Liczba przeglądów, wdrożenie uwag, kompletność metadanych językowych	Liczba iteracji, uwagi i ich wdrożenie, kompletność metadanych PL–HSB–DE	Protokoły przeglądów, formularze walidacji metadanych	CDE → interesariusze → protokoły i metadane
Gotowość do konserwacji zapobiegawczej	Kompletność map stanu, wartości bazowe do monitoringu	Procent powierzchni pokrytej mapami np. uszkodzeń tynków i wysoleń, wartości wyjściowe pomiarów (np. rozwarłość rys, wilgotność)	Ortofotoplany metryczne z oznaczeniami, arkusze pomiarów bazowych	CDE → konserwacja → mapy stanu CDE → monitoring

Tab. 5. Wskaźniki rezultatów i szablony raportowania dla projektów dokumentacji dziedzictwa

Model pozostaje skalowalny i możliwy do adaptacji do różnych typów obiektów, pod warunkiem dostosowania bibliotek elementów oraz struktur metadanych do lokalnych uwarunkowań [Chen et al. 2025; Volk et al. 2014].

W tabeli 5 zestawiono wskaźniki rezultatów oraz praktyczny szablon raportowania, przekładający założenia modelu na działania związane z monitorowaniem, przekazywaniem i ponownym wykorzystaniem wyników. Określa on zakres danych wymaganych w raportach, stosowane wskaźniki, metody ich weryfikacji oraz miejsca przechowywania informacji w CDE. Szablon pozostaje zgodny z kryteriami jakości przyjętymi w projekcie i łączy je z zapisami przebiegu prac oraz informacjami uzyskanymi od interesariuszy, zapewniając przejrzystość postępu prac i identyfikację ewentualnych niezgodności. Prezentowana tabela ma charakter uproszczony i przedstawia najważniejsze wskaźniki oraz metody raportowania.

Ograniczenia i rekomendacje

Przedstawione ramy pracy napotykają ograniczenia wynikające zarówno z warunków technicznych, jak

tively enhance interoperability and strengthen stakeholder confidence. The model remains scalable and can be adapted to different types of heritage assets, provided that element libraries and metadata structures are adjusted to local conditions [Chen et al. 2025; Volk et al. 2014].

Table 5 presents a set of performance indicators and a practical reporting template that translates the assumptions of the model into procedures for monitoring, delivering, and reusing project outputs. The template specifies the scope of information required in reports, the indicators applied, the methods used for their verification, and the locations where information is stored within the CDE. It remains consistent with the quality criteria adopted for the project and combines them with project records and stakeholder feedback, ensuring transparency of progress and facilitating the identification of potential non-conformities. The table presented here is a simplified version highlighting the most important indicators and reporting methods.

Limitations and recommendations

The proposed framework is subject to limitations arising from both technical and organizational conditions.

Layer	Main objectives	Key activities	Quality indicators	Core tools	Main outputs
Technical	Accurate acquisition of geometry and surface information, consistent integration of data within HBIM	TLS: scan-position planning, registration, and RMS error reporting Photogrammetry: image acquisition planning, image alignment, metric orthophoto generation Integration: HBIM element classes and links to image-based documentation	Coverage rate, point density, RMS error, GSD, results of HBIM classification checklists	TLS and photogrammetric software, point-cloud editors, HBIM environment	Registered point clouds, aligned image sets, metric orthophotos, semantically enriched HBIM components
Management	Predictable project delivery, control of risks and changes	Phase planning (WBS, schedule, budget), risk and change registers, progress reporting	Schedule compliance, cost variance, risk status, effectiveness of change management	Scheduling tools, task registers, CDE	Approved plans, risk and change registers, status reports, decisions documented in the CDE
Quality	Continuous quality assurance and quality control, documented reviews	QA plan, QC testing, audits, verification of orthophotos and HBIM models, corrective actions, approvals within the CDE	Compliance with quality thresholds (coverage, density, RMS, GSD, metadata completeness), closure of non-conformities, completeness of records	QA checklists, verification tools, approval workflows within the CDE	QA plan, QC reports, audit logs, approval records
Logistics	Safe and efficient fieldwork, stable data infrastructure	Access planning, health and safety procedures, equipment management, backups, version control, storage procedures	Number of repeated surveys, health and safety incidents, data recovery time, version integrity	Health and safety (H&S) procedures, storage platforms, version-control systems	Logistics plan, H&S logs, storage and backup records, version history
Stakeholders	Clear allocation of responsibilities, community participation, multilingual documentation	Definition of roles, project reviews, metadata preparation (PL-HSB-DE), approvals within the CDE	Effectiveness of reviews, implementation of comments, metadata completeness	Controlled vocabularies and templates, CDE approval workflows, consultation protocols	Stakeholder register, review records, multilingual metadata, publication packages

Table 4. Digital Heritage Project Management Model Matrix

Performance dimension	Indicator	What to report	Typical method	Storage
Documentation quality	Scan registration RMS error, GSD, coverage rate	RMS values, orthophoto GSD, percentage of surface coverage meeting quality criteria	TLS registration report, image alignment report, coverage and visibility assessment	CDE → QA/QC folder → survey reports
HBIM model integrity	Completeness of element classification, consistency of identifiers	Percentage of elements assigned to the correct HBIM classes; results of element identifier validation	HBIM validation script, classification checklist	CDE → model repository → HBIM validation records
Project delivery	Schedule performance, cost variance, status of risks and changes	Planned vs. actual progress (schedule), budget variance, number and status of entries in risk and change registers	Project dashboard, Earned Value Management (EVM) report, risk and change registers	CDE → project workspace → status reports
Stakeholder engagement	Number of reviews, implementation of comments, completeness of multilingual metadata	Number of review iterations, comments received and implemented, completeness of PL-HSB-DE metadata	Review records, meta-data validation forms	CDE → stakeholders → review records and meta-data
Readiness for preventive conservation	Completeness of condition maps, baseline values for monitoring	Percentage of surfaces covered by condition maps (e.g. plaster deterioration or salt efflorescence); baseline measurement values (e.g. crack width, moisture content)	Metric orthophotos with condition annotations, baseline measurement sheets	CDE → conservation → condition maps CDE → monitoring

Table 5. Performance indicators and reporting template for heritage documentation projects

i organizacyjnych. W wysokich partiach sklepień oraz w wąskich przejściach ograniczona widoczność utrudnia pozyskanie danych TLS, a powierzchnie silnie odbijające światło (np. polerowany kamień, złocenia czy szkło) mogą powodować zniekształcenia fotogrametryczne. Ograniczony dostęp do obiektów może dodatkowo zaburzać planowaną sekwencję prac, a w takich sytuacjach konieczne bywa uzupełnienie lub powtórzenie pomiarów.

Modelowanie informacji wiąże się z odrębnymi wyzwaniem. Biblioteki detali historycznych pozostają niepełne, szczególnie w wypadku obiektów drewnianych, co zwiększa nakład pracy związanej z modelowaniem. Złożone, nieortogonalne geometrie i nawarstwienia historyczne wymagają starannego przejścia od chmury punktów do modelu, tak aby zachować zarówno wierność geometryczną, jak i spójność semantyczną. Metadane wielojęzyczne oraz uzgodnienia z lokalnymi interesariuszami są konieczne, lecz mogą wydłużać proces.

Ograniczenia interoperacyjności IFC mogą wymagać udokumentowanych procedur obejściowych, aby utrzymać identyfikatory elementów i relacje między nimi. Wydajność CDE zależy z kolei od strategii przechowywania danych, wykonywania kopii zapasowych oraz wersjonowania dużych zbiorów, takich jak chmury punktów i ortofotoplany, co bywa wyzwaniem przy wielu obiektach o dużej skali dokumentacji.

Ryzyka techniczne można ograniczać poprzez działania uwzględnione w metodyce i planie jakości. Wysokie partie obiektów dokumentuje się z podestów lub stanowisk dalekiego zasięgu, zaś ujęcia ukośne i kontrolowane oświetlenie sztuczne redukują zasłonię-

cia. In high vault zones and narrow passageways, restricted visibility may hinder TLS data acquisition, while highly reflective surfaces, such as polished stone, gilded elements, or glass, may cause photogrammetric distortions. Restricted access to heritage sites may further disrupt planned workflows, making supplementary or repeated surveys necessary in certain situations.

Information modelling is associated with a distinct set of challenges. Libraries of historical details remain incomplete, particularly for timber structures, increasing the effort required for model development. Complex non-orthogonal geometries and historical stratifications require a carefully managed transition from point clouds to HBIM models in order to preserve both geometric fidelity and semantic consistency. The preparation of multilingual metadata and coordination with local stakeholders are also necessary, although these activities may extend project timelines.

Limitations in IFC interoperability may require documented workaround procedures to preserve element identifiers and the relationships between them. The efficiency of the Common Data Environment (CDE), in turn, depends on appropriate strategies for storing, backing up, and versioning large datasets such as point clouds and orthophotos, which may become challenging in projects involving multiple heritage assets and extensive documentation campaigns.

Technical risks can be mitigated through measures incorporated into the methodology and quality plan. Elevated areas of buildings can be documented from platforms or long-range survey stations, while oblique image acquisition and controlled artificial lighting reduce occlusions and improve image consist-

cia i stabilizują jakość obrazów. Ostrożne filtrowanie chmur punktów pomaga zachować subtelne krzywizny sygnalizujące deformacje. Ustandaryzowane szablony elementów HBIM i metadanych zmniejszają nakład pracy i poprawiają jednorodność wyników. Widoczne w CDE wymagania jakościowe, obejmujące pokrycie, gęstość, RMS, GSD i kompletność metadanych, pozwalają wykrywać niezgodności na wczesnym etapie i wdrażać działania korygujące. Jasne procedury zarządzania zmianami i wersjonowaniem zapewniają pełną historię pracy nad danymi.

Rekomendacje dotyczące dalszych prac obejmują rozwój bibliotek semantycznych zawierających detale historyczne i połączenia ciesielskie charakterystyczne dla regionu, dopracowanie przepływów metadanych, szczególnie wielojęzycznych, oraz włączenie okresowych pomiarów powtarzalnych do monitorowania zmian. Połączenie ortofotoplanów metrycznych z repetycjami skaningu i narzędziami automatycznej detekcji zmian może wzmocnić działania konserwacji zapobiegawczej. Warto również rozwijać szkolenia z zarządzania informacją i zapewnienia jakości, aby zespoły mogły konsekwentnie stosować przyjęte standardy w różnych obiektach i lokalizacjach.

Wnioski

Połączenie danych hybrydowych z modelowaniem HBIM oraz uporządkowanym zarządzaniem informacją tworzy metodykę umożliwiającą uzyskanie wyników dokładnych i zgodnych z przyjętymi kryteriami odbioru, a jednocześnie skalowalnych dla zróżnicowanych typologii obiektów sakralnych. Spójne nazewnictwo, identyfikatory i struktury metadanych wzmacniają długoterminowe zarządzanie dziedzictwem i zwiększają interoperacyjność dokumentacji [Volk et al. 2014; Bruno, Roncella 2018; Chen et al. 2025].

Z przeprowadzonej analizy wynikają rekomendacje praktyczne. Planowanie pozyskiwania danych powinno uwzględniać ryzyka wynikające z typologii i materiałów, natomiast modele HBIM warto rozwijać w oparciu o klasy elementów z atrybutami stanu, wspierające działania konserwacji zapobiegawczej. Jasne procedury jakości i kontrola wersji w CDE ułatwiają przekazywanie wyników i ograniczają konieczność powtórnych pomiarów. Ważną rolę odgrywa również logistyka dokumentacji, która wpływa na kompletność danych i stabilność procesu. Udział interesariuszy oraz odpowiednie zarządzanie prawami i dostępem do danych zwiększają transparentność i sprzyjają budowaniu zaufania społecznego [Kuroczyński, Argasiński 2025; Penjor et al. 2024].

Ograniczenia zidentyfikowane powyżej wyznaczają kierunki dalszych badań. Zasłonięcia elementów wysoko położonych i ograniczony dostęp do obiektów wciąż obniżają kompletność danych, a biblioteki detali HBIM pozostają niejednorodne. Przygotowanie metadanych wielojęzycznych zwiększa nakład

ency. Careful filtering of point clouds helps preserve subtle curvatures that may indicate structural deformation. Standardized HBIM component templates and metadata structures reduce modelling effort and improve the consistency of project outputs. Quality requirements visible within the CDE, including coverage rate, point density, RMS error, GSD, and metadata completeness, enable the early identification of non-conformities and the implementation of corrective actions. Clear change-management and version-control procedures ensure the complete traceability of all modifications made to project data.

Recommendations for future work include the further development of semantic libraries containing region-specific historical details and traditional timber joints, refinement of metadata workflows, particularly multilingual metadata structures, and the incorporation of periodic repeat surveys into monitoring programs. The combination of metric orthophotos with repeated laser scanning campaigns and automated change-detection tools may strengthen preventive conservation strategies. Further effort should also be directed towards training in information management and quality assurance so that project teams can apply established standards consistently across different heritage assets and locations.

Conclusions

The integration of hybrid datasets, HBIM modelling, and structured information management provides a methodology capable of delivering accurate results that comply with predefined acceptance criteria while remaining scalable across diverse typologies of religious heritage buildings. Consistent naming conventions, element identifiers, and metadata structures strengthen long-term heritage management and improve the interoperability of documentation resources [Volk et al. 2014; Bruno, Roncella 2018; Chen et al. 2025].

The analysis leads to several practical recommendations. Data acquisition planning should consider risks associated with building typology and material characteristics, while HBIM models should be developed using element classes enriched with condition-related attributes that support preventive conservation activities. Clearly defined quality procedures and version control within the CDE facilitate the delivery of project outputs and reduce the need for repeated surveys. Documentation logistics also plays an important role, influencing both data completeness and process stability. Stakeholder engagement, together with appropriate management of data ownership, access rights, and permissions, contributes to transparency and public trust [Kuroczyński, Argasiński 2025; Penjor et al. 2024].

The limitations identified above indicate directions for future research. Occlusions affecting elevated architectural elements and restricted access to heritage sites still reduce data completeness, while HBIM object libraries remain inconsistent and unevenly developed. The preparation of multilingual metadata also increas-

pracy. Stała rozbudowa bibliotek elementów, standaryzacja schematów metadanych oraz szkolenia z zakresu zarządzania informacją i jakości mogą znacząco poprawić efektywność procesu. Dalsze prace powinny obejmować regularny monitoring, wykorzystanie automatycznej detekcji zmian oraz ocenę efektywności kosztowej metodyki w odniesieniu do obiektów o różnej skali [Miky et al. 2024; Chen et al. 2025; Alshawabkeh et al. 2024].

Podsumowując, wielosensorowa dokumentacja osiąga pełną wartość użytkową tylko wówczas, gdy jest osadzona w uporządkowanych ramach zarządzania i jakości, dostosowanych do specyfiki materiałowej i typologicznej obiektów. Zaproponowane w pracy podejście, integrujące pozyskiwanie danych, modelowanie HBIM, logistykę, metadane oraz udział interesariuszy, zapewnia trwałe i interdyscyplinarne podstawy zarządzania dziedzictwem w regionie.

es project effort. The continued expansion of element libraries, the standardization of metadata schemas, and further training in information and quality management could substantially improve process efficiency. Future studies should include regular monitoring programs, the application of automated change-detection methods, and assessments of the cost-effectiveness of the methodology for heritage assets of different scales [Miky et al. 2024; Chen et al. 2025; Alshawabkeh et al. 2024].

In conclusion, multi-sensor documentation achieves its full practical value only when embedded within structured management and quality frameworks adapted to the material and typological characteristics of heritage assets. The approach proposed in this study, integrating data acquisition, HBIM modeling, logistics, metadata management, and stakeholder participation, provides a durable and interdisciplinary foundation for heritage management within the region.

Bibliografia / References

- 3D recording, documentation and management of cultural heritage, red. Stylianidis Efstratios, Remondino Fabio, Dunbeath 2016.
- Alshawabkeh Yahya, Baik Ahmad, Miky Yehia, *HBIM for conservation of built heritage*, „ISPRS International Journal of GeoInformation” 2024, t. 13 (7), 231.
- Banaś Paweł, *Kościół poewangelickie na terenie woj. wrocławskiego. Stan zachowania. Problemy konserwatorskie*, „Ochrona Zabytków” 1966, t. 19 (4).
- Bednarz Łukasz, *Monitoring diagnostyczny obiektów historycznych*, Wrocław 2023.
- Brumana Raffaella, Banfi Fabrizio, Cantini Lorenzo, Previtali Mattia, Della Torre Stefano, *HBIM level of detail-geometry-accuracy and survey analysis for architectural preservation*, „The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences” 2019, t. 42.
- Bruno Nazarena, Roncella Riccardo, *A restoration oriented HBIM system for cultural heritage documentation: The case study of Parma Cathedral*, „The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences” 2018, t. 42.
- Bruno Nazarena, Roncella Riccardo, *HBIM for Conservation: A New Proposal for Information Modeling*, „Remote Sensing” 2019, t. 11 (15), artykuł 1751.
- Chen Lianxin, Dai Chengyuan, Zhou Mi, Lu Jinjin, *Development and application of an HBIM method for timber structures integrated with digital technologies*, „Heritage Science” 2025, t. 13, artykuł 381.
- Dolińska Noëlla, Wojciechowska Gabriela, Bac-Brownicz Joanna, Bednarz Łukasz J., *GEPRs: A Geospatially Enabled Predictive Recommendation System for the Preventive Management of Historical Buildings*, „ISPRS International Journal of Geo-Information” 2025, t. 15 (1), 1.
- Fassi Francesco, Achille Cristiana, Fregonese Luigi, Monti Carlo, *Multiple data source for survey and modelling of very complex architecture*, „International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences” 2010, t. 38 (cz. 5).
- Grussenmeyer Pierre, Alby Emmanuel, Assali Pierre, Poitevin Valentin, Hullo Jean- François, Smigiel Eddie, *Accurate documentation in cultural heritage by merging TLS and high-resolution photogrammetric data*, [w:] *Videometrics, Range Imaging, and Applications XI*, red. Fabio Remondino, Mark R. Shortis, „Proceeding of SPIE”, t. 8085, Bellingham 2011.
- Kantorowicz Klara, *Usage of digital surveying techniques in monuments of wooden architecture: Example of documentation of churches on Silesia and Lesser Poland border*, „Architectus” 2023, t. 76 (4).
- Kuroczyński Piotr, Argasiński Karol, *Implementing HBIM for cultural heritage preservation: From documentation to sustainable management*, „ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences” 2025, t. X-M-2-2025.
- López Facundo, Leronés Pedro., Llamas José, Gómez-García-Bermejo Jaime, Zalama Eduardo, *A review of heritage building information modeling (HBIM)*, „Multimodal Technologies and Interaction” 2018, t. 2 (2), artykuł 21.
- Malinverni Eva S., Mariano Fabio, Di Stefano Francesco, Petetta Leonardo, Onori Federica, *Modelling in HBIM to document materials decay by a thematic mapping to manage the cultural heritage: The case of “Chiesa della Pietà” in Fermo*, „The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences” 2019, t. 42.
- Miky Yehia, Alshawabkeh Yahya, Baik Ahmad, *Using deep learning for enrichment of heritage BIM: Al Radwan house in historic Jeddah as a case study*, „Heritage Science” 2024, t. 12 (1), artykuł 255.
- Penjor Tshering, Banihashemi Saeed, Hajirasouli Aso., Golzad Hamed, *Heritage building information modeling for heritage conservation: Framework of challenges, gaps, and limitations of HBIM*, „Digital Applications in Ar-

- chaeology and Cultural Heritage” 2024, t. 35, artykuł e00366.
- Remondino Fabio, Rizzi Alessandro, *Reality-based 3D documentation of natural and cultural heritage sites-techniques, problems, and examples*, „Applied Geomatics” 2010, t. 2 (3).
- Sokoł Aneta M., *Review of „Wszystko osiąga się przez nadzieję... Kulturowe dziedzictwo Reformacji na Śląsku”*, „Nowa Biblioteka” 2018, t. 3 (30).
- Szałygin Jerzy, *Zasoby i zagrożenia zabytkowej drewnianej architektury sakralnej w Polsce*, „Wiadomości Konserwatorskie – National Heritage” 2003, t. 13.
- Szczepankiewicz-Battek Joanna, *Kościół graniczne i ucieczkowe w krajobrazie kulturowym pogranicza śląsko-łużyckiego i ziemi legnickiej*, „Studia z Geografii Politycznej i Historycznej 2015”, t. 4.
- Taileb Ali, Dekkiche Hamoud, Sherzad Mohammed F., *HBIM: A tool for enhancing the diagnosis of historical buildings: The case of St. George’s Memorial Anglican Church, Oshawa*, „Heritage” 2023, t. 6 (8).
- Ulvi Ali, *Documentation, Three-Dimensional (3D) Modelling and visualization of cultural heritage by using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photogrammetry and terrestrial laser scanners*, „International Journal of Remote Sensing” 2021, t. 42 (6).
- Volk Rebekka, Stengel Julian, Schultmann Frank, *Building information modeling for existing buildings: Literature review and future needs*, „Automation in Construction” 2014, t. 38.
- Wojciechowska Gabriela, Bednarz Łukasz J., Dolińska Noëlla, Opałka Piotr, Krupa Michał, Imnadze Nino, *Intelligent monitoring system for integrated management of historical buildings*, „Buildings” 2024, t. 14 (7), artykuł 2108.
- Yastikli Naci, *Documentation of cultural heritage using digital photogrammetry and laser scanning*, „Journal of Cultural Heritage” 2007, t. 8 (4).
- Yilmaz Haci M., Yakar Murat, Gulec Saadet A., Dulgeler Osman N., *Importance of digital close-range photogrammetry in documentation of cultural heritage*, „Journal of Cultural Heritage” 2007, t. 8 (4).

Streszczenie

Artykuł przedstawia metodykę kompleksowego dokumentowania i zarządzania dziedzictwem sakralnym na przykładzie obiektów ze Śląska i Górnych Łużyc, opartą na integracji zaawansowanych technik pomiarowych, modelowania informacji o obiekcie oraz standaryzacji procesów projektowych. Opracowane podejście łączy metody wielosensorowego pozyskiwania danych, takie jak naziemny skanowanie laserowe oraz fotogrametria bliskiego zasięgu, z semantycznym modelowaniem w środowisku Heritage Building Information Modelling (HBIM) oraz zarządzaniem projektem i jakością zgodnie ze standardami ISO 19650. W dalszej części omówiono sposób organizacji procesu pozyskiwania i przetwarzania danych, zapewniający spójność materiałów wejściowych wykorzystywanych do modelowania i analiz. Chmury punktów i ortofotoplany wspierają mapowanie stanu zachowania, analizę ryzyka oraz planowanie konserwacji zapobiegawczej. Warstwa zarządzania informacją obejmuje definiowanie zakresu prac, harmonogramowanie, kontrolę ryzyka i zmian oraz określenie parametrów kontroli jakości dotyczących m.in. pokrycia, gęstości danych, wartości błędu RMS rejestracji skanów oraz kompletności metadanych we wspólnym środowisku danych. Wyniki pokazują, że dokładność techniczna zależy przede wszystkim od dobrej organizacji prac i jasno zdefiniowanych procedur kontroli jakości, a wielojęzyczne metadane zwiększają dostępność. Artykuł kończy się propozycją Modelu Cyfrowego Zarządzania Projektem dla Dziedzictwa, integrującego procesy pozyskiwania danych, modelowania, zarządzania informacją oraz partycypacji interesariuszy. Przedstawiona metodyka może być stosowana w różnych miejscach i skalach – od dokumentacji po działania konserwatorskie.

Abstract

This article presents a methodology for the comprehensive documentation and management of religious heritage using cases from Silesia and Upper Lusatia. The proposed approach is based on the integration of advanced surveying techniques, heritage information modelling, and the standardization of project processes. It combines multi-sensor data acquisition methods, including terrestrial laser scanning and close-range photogrammetry, with semantic modelling in a Heritage Building Information Modelling (HBIM) environment, as well as project and quality management procedures aligned with ISO 19650 standards. The study further discusses the organization of data acquisition and processing workflows designed to ensure the consistency of input materials used for modelling and analytical purposes. Point clouds and orthophotos support condition assessment, risk analysis, and preventive conservation planning. The information management layer includes the definition of project scope, scheduling, risk and change control, and the establishment of quality control parameters related to data coverage, data density, scan registration RMS error, and metadata completeness within a Common Data Environment (CDE). The results demonstrate that technical accuracy depends primarily on effective project organization and clearly defined quality control procedures, while multilingual metadata significantly improve accessibility and long-term usability. The article concludes with a proposal for a Digital Heritage Project Management Model that integrates data acquisition, information modelling, information management, and stakeholder participation. The methodology may be applied across a variety of heritage contexts and scales, ranging from documentation activities to conservation interventions.