

Od chmury punktów do analizy zniszczeń

Integracja mobilnego skanowania laserowego SLAM i technologii HBIM w diagnostyce strukturalnej obiektów zabytkowych

Krzysztof KARSZNIA, Alicja DYMOWSKA, Krzysztof KSIAŻEK,
Natalia KABLAK

Wydział Geodezji i Kartografii
Politechniki Warszawskiej

Wrocław, 22.05.2026





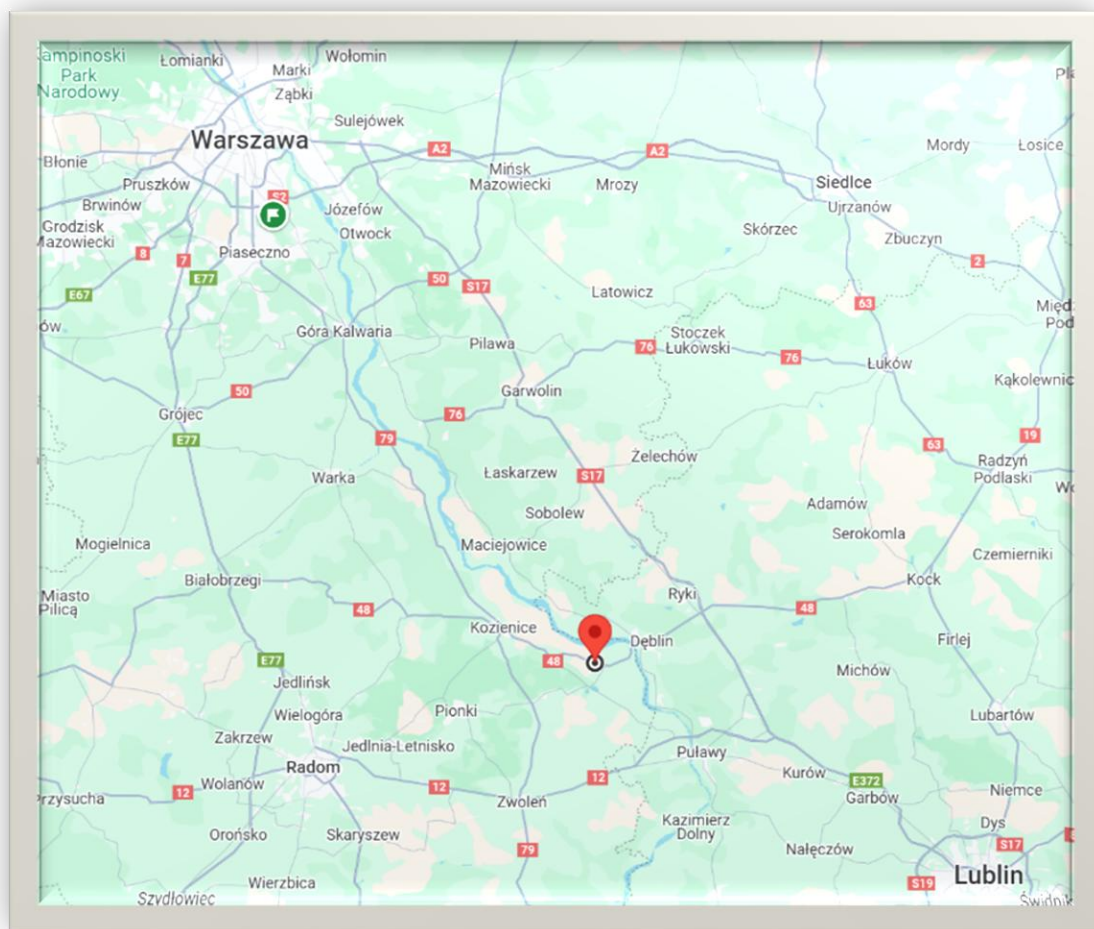
Plan wystąpienia

- Obiekt badań
- Metodyka
- Ocena stanu obiektu
- Podsumowanie i wnioski



Obiekt badań

Prace prowadzone są w opactwie pobenedyktynskim w Sieciechowie (Dęblin) i wpisują się w nurt badań zespołu nad bezpieczeństwem zabytków przy wykorzystaniu technik geoinformacyjnych.



Sieciechów/Opactwo, k. Dębina

~100 km od Warszawy

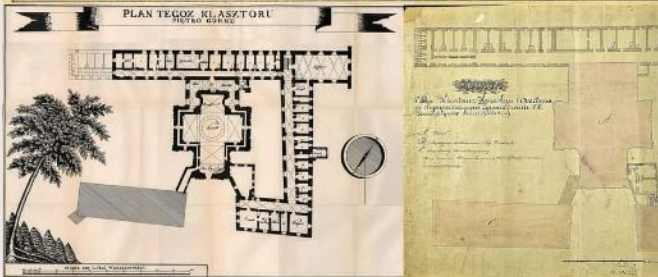
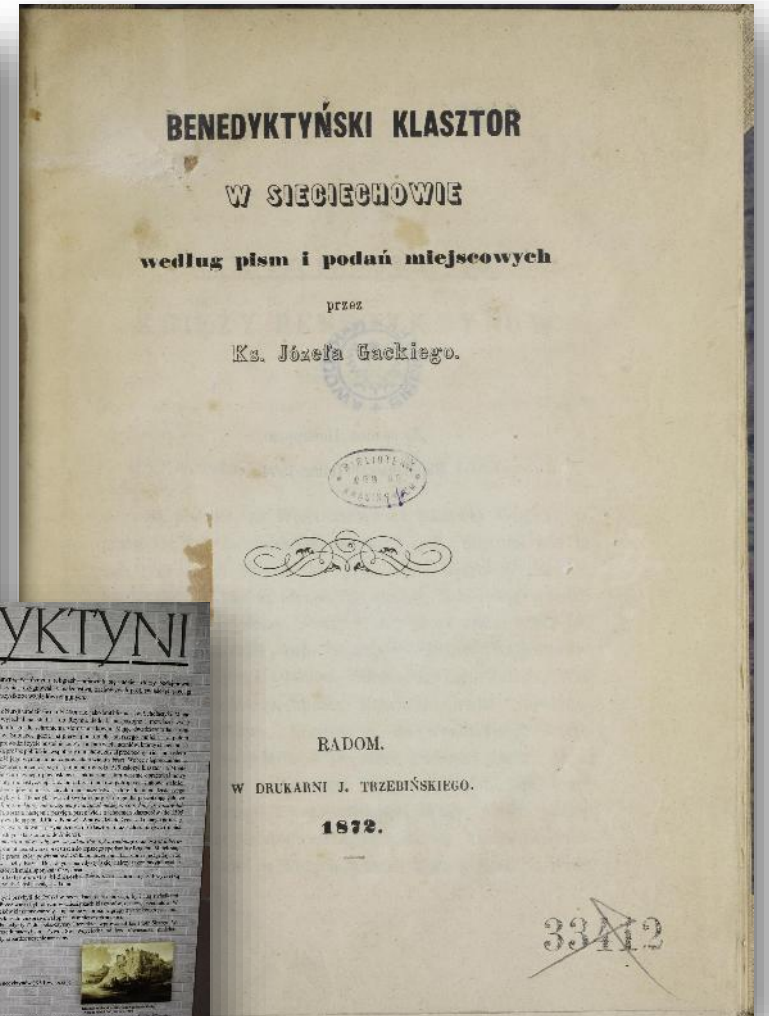
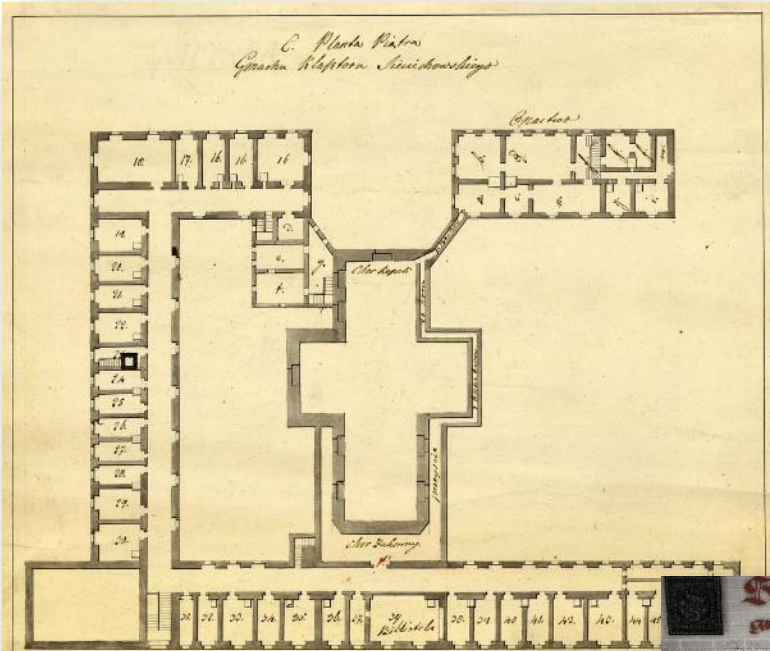
Teren starorzecza Wisły

Obszar użytkowany rolniczo

Benedyktynskie opactwo XIII wieku



Opactwo pobenedyktyńskie w Sieciechowie





Opactwo pobenedyktyńskie w Sieciechowie

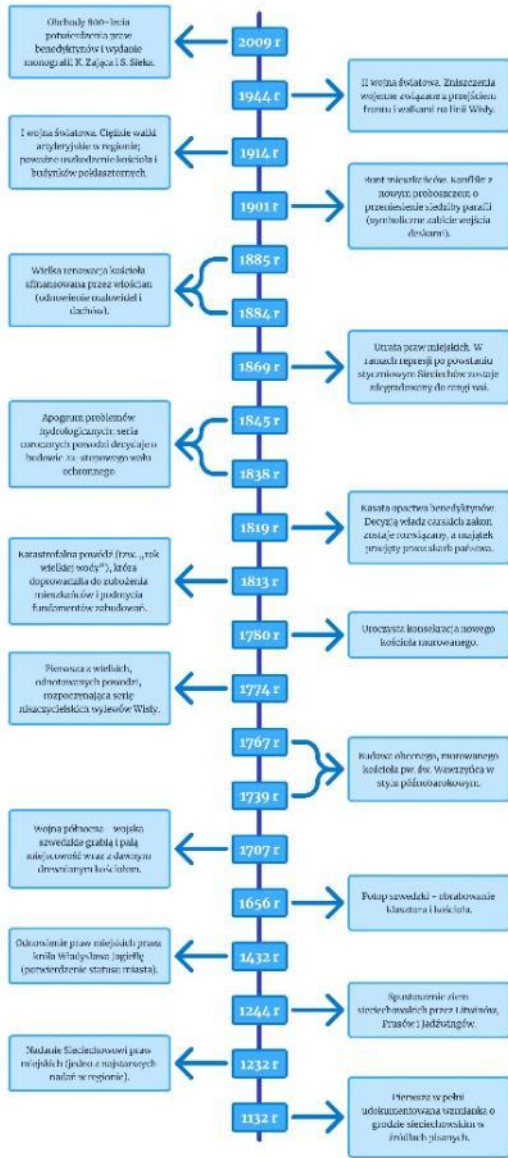


Fot. K. Karsznia

- Opactwo pobenedyktyńskie w Sieciechowie jest **jednym z najstarszych i najważniejszych zabytków sakralnych** w regionie.
- Założenie opactwa wiąże się z **osobą palatyna Sieciecha, bliskiego współpracownika króla Władysława Hermana**, który sprowadził benedyktynów z klasztoru św. Idziego w Prowansji na przełomie XI i XII wieku.
- Pierwsze wzmianki o klasztorze można znaleźć w **kronice Galla Anonima**, w związku z przywilejem z 1252 roku nadanym przez Bolesława Wstydlwego (rozbięcie dzielnicowe Polski).
- Kompleks klasztorny był rozbudowywany w kilku etapach. Najważniejsze budynki powstały w XVIII wieku: refektarz w 1780 roku, kościół ukończony w 1763 roku oraz pałac opata w 1800 roku.



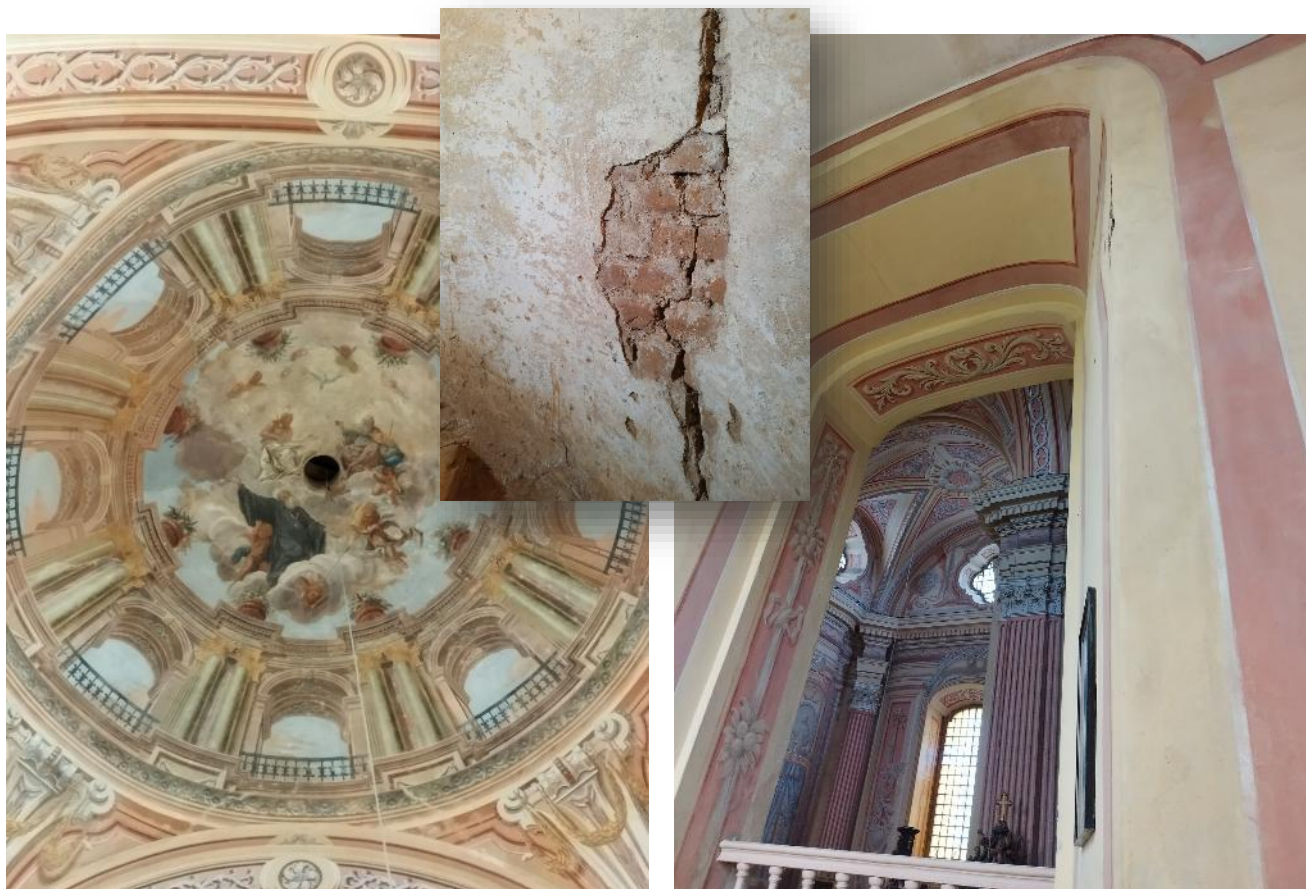
Zarys dziejów Sieciechowa



- We wczesnym średniowieczu rzeka Wisła płynęła szerokimi meandrami i otaczała nowo założony klasztor benedyktyński.
- Źródła podają, że w 1600 roku rzeka otaczała klasztor, płynąc blisko jego murów (Stępień i Majcher, 2023).
- W 1726 roku Wisła nagle zmieniła kierunek i nie była już widoczna z klasztoru.



Opactwo pobenedyktynskie w Sieciechowie



Fot. K. Karsznia

- Wpływ struktury geologicznej podłoża na możliwość uszkodzeń strukturalnych
- Potrzeba przeprowadzenia prac renowacyjnych i konserwatorskich
- Zniszczenie budynków opactwa – zwłaszcza klasztornych
- Unikalna architektura i relikty przeszłości



Opactwo pobenedyktynskie w Sieciechowie



- Pęknięcia na sklepieniu i ścianach
- Odpadający tynk
- Zniszczenie kratownicy dachowej
- Zniszczenie polichromii i wyposażenia kościelnego



Opactwo pobenedyktynskie w Sieciechowie



- Inwentarz opactwa
- Monitorowanie stanu technicznego obiektów
- Budowa historycznego BIM do konserwacji i zarządzania obiektami



Pic. K. Karsznia



Motywacja do opracowania H-BIM

Kategoria prac	Zakres prac	Technologia/Materiały	Uwagi
Pomiary i dokumentacja	Pełny inwentaryzator architektoniczny i konserwatorski, skanowanie laserowe 3D, fotogrametria	TLS/Skanowanie MLS, fotogrametria, analiza stratygraficzna	Podstawa planowania i pozwoleń
Stabilizacja strukturalna	Konsolidacja ścian, wzmocnienie sklepień, fundamenty podkładowe	Zaprawa wapienna, kotwy ze stali nierdzewnej, mikropale	Priorytet dla stref zagrożonych
Hydroizolacja i drenaż	Izolacja pozioma/pionowa, instalacja drenażu	Membrany bitumiczne (bitumiczne), systemy kapilarno-odcinające, odpływy rowowe	Aby zmniejszyć wilgoć w kapilarach
Konserwacja dzieł sztuki	Renowacja fresków, ławek i konserwacja organów	Retusz, konsolidacja, iniekcje, wosk-żywica do drewna	Prace konserwatorskie
Naprawy dachów i el. drewnianych	Remont dachu, wzmocnienie kratownic, naprawa systemu rynnowego	Płytki ceramiczne/drewniane, obróbki miedziane, środki antyseptyczne do drewna	Historyczne szczegóły powinny być zachowane
Renowacja historycznych elementów wyposażenia	Drzwi, okna, żelazne konstrukcje, dostęp do krypt	Kute żelazo, restauracja dębu, wapno, czyszczenie laserowe	Zachowanie oryginalnego rzemiosła
Rewitalizacja okolicy opactwa	Przebudowa ścieżki na dziedzińcu, odnowienie bram i ogrodzeń	Granitowa nawierzchnia, restauracja kamienia, tradycyjne tynkarstwo	Na podstawie historycznego układu
Systemy monitoringu	Montaż czujników wilgotności, drgań i temperatury	Czujniki IoT, rejestratory danych, systemy zarządzania oparte na chmurze	Ciągłe rejestrowanie danych o ochronie
Bezpieczeństwo przeciwpożarowe	Systemy alarmowe, wykrywanie i gaszenie pożarów	Bezprzewodowe systemy bezpieczeństwa	
Edukacja i interpretacja	Integracja modeli HBIM, oznakowanie	HBIM, AR/VR aplikacje, materiały muzealne	Dla odwiedzających i do użytku akademickiego



Strategia pomiarowa



- Mobilne skanowanie laserowe z użyciem Faro Orbis z funkcją Flash
- Naziemne skanowanie laserowe Leica RTC360
- Naloty UAV DJI M4D

Fot. K. Karsznia



Faro ORBIS MLS



Performance	
General	
Range	120m
Points Per Second	640,000
Field of View	360° x 290°
No. of LIDAR channels	32
Camera	Full 360° image of 72M pixels captured every second
Mobile Scanning	
Precision ¹	5mm
Trajectory & Mapping	Robust SLAM powered by GeoSLAM technology
Settings	Automatic Standard and Preset Processing Environments
Stationary Flash Scanning	
Precision ¹	2mm
Duration	15 sec. including color
Resolution	19M points (13mm @ 10m)
Registration	Real Time and Fully Automatic with GeoSLAM technology

- Mobilny skaner napędzany technologią GeoSLAM, oferujący mobilne i stacjonarne skanowanie Flash w jednym urządzeniu
- Aplikacja mobilna do obsługi terenowej FARO Orbis oraz FARO Focus Laser Scanner
- Oprogramowanie do przetwarzania komputerowego dla FARO Orbis oraz starszych mobilnych skanerów GeoSLAM



- **Cel naukowy:** Przedstawienie efektywnej, bezinwazyjnej ścieżki metodologicznej (workflow) – od szybkiego pozyskania danych geometrycznych po zaawansowaną analizę i mapowanie uszkodzeń.

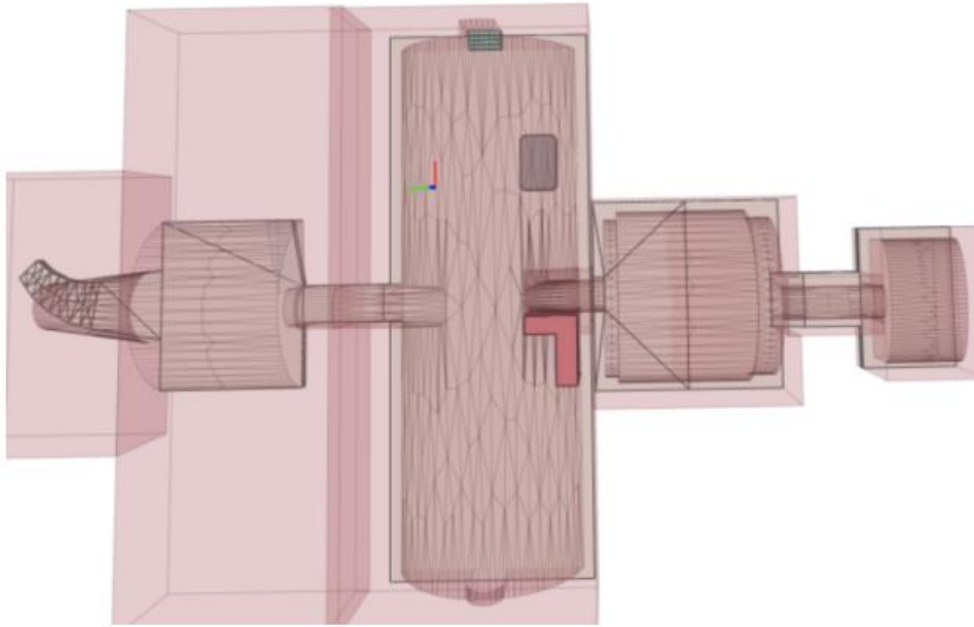


Opr. A. Dymowska

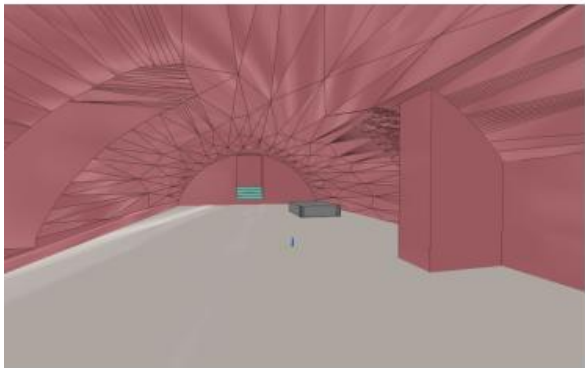
Kontekst i problematyka: Wyzwania w inwentaryzacji obiektów zabytkowych (trudno dostępne miejsca, skomplikowana geometria, ograniczenia czasowe tradycyjnego skanowania stacjonarnego TLS).

Dlaczego SLAM? Przewaga mobilnego skanowania nad skanowaniem stacjonarnym w trudnych wnętrzach zabytkowych (np. ciasne krypty, wieże, krużganki).

Pozyskiwanie danych: Parametry techniczne użytego skanera, planowanie trajektorii przejścia, dokładność i gęstość uzyskanej chmury punktów.



Rzut od góry modelu katakumb przy użyciu programu BIM Vision.

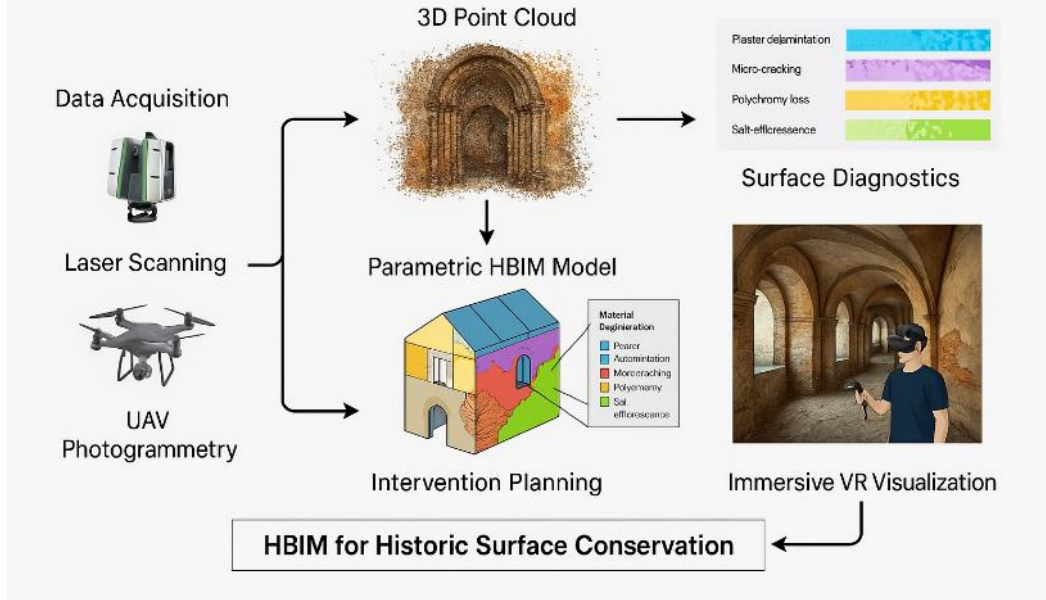


Widok środka katakumb przy użyciu programu BIM Vision.

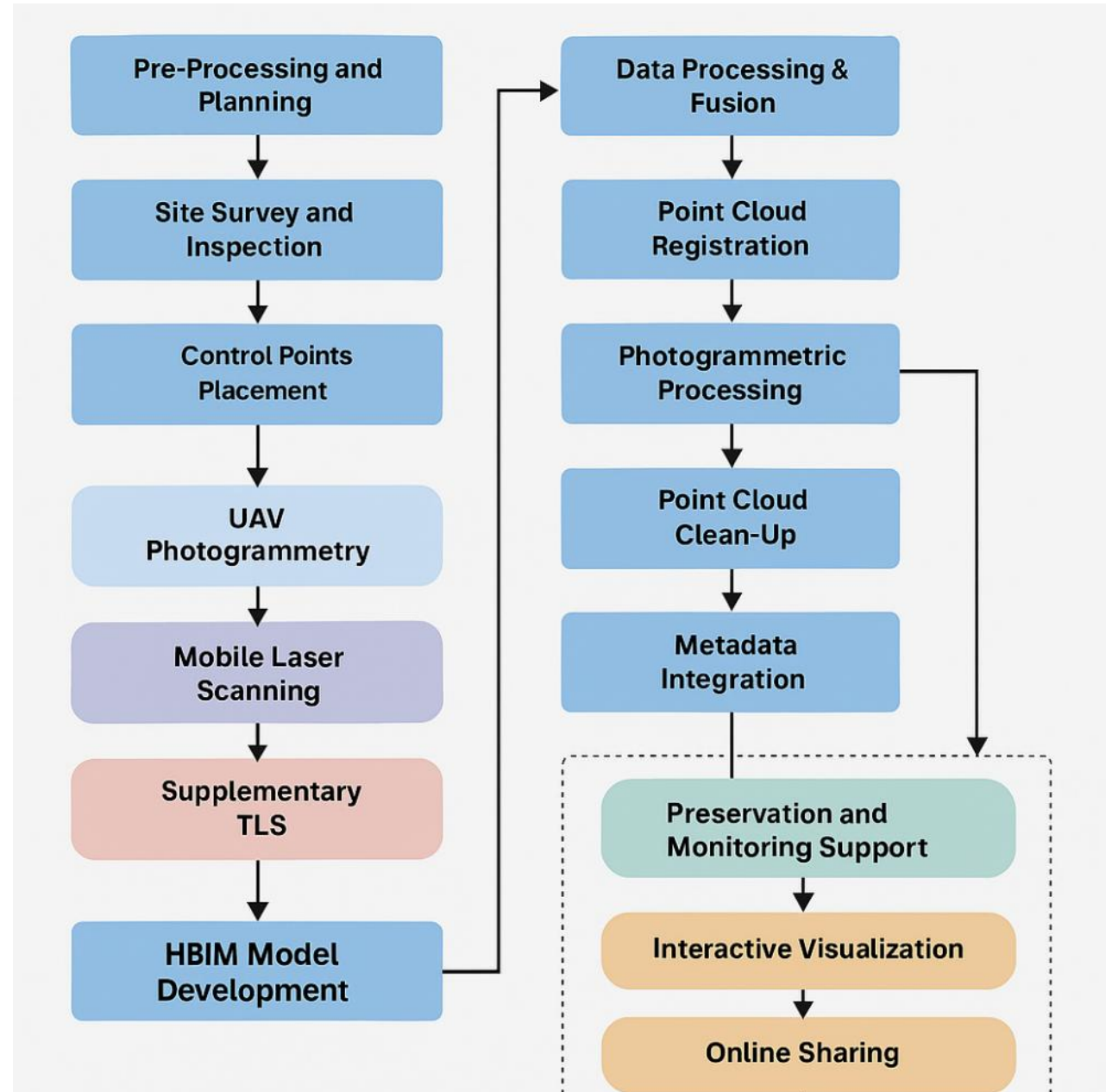




HBIM for Historic Surface Conservation



HIGH-PRECISION TOOLS AND TOLERANCES FOR HISTORIC SURFACE CONSERVATION		
Application	Tool of Choice	Expected Accuracy
Full-structure Scanning	Leica RTC 360 Leica P40 / P50 FARO Focus Premium	±1–2 mm
High-detail Documentation	Structured Light: Fringe projection Artec Space Spider GOM ATOS, Creaform MetraSCAN	± 0,05–0,1 mm
Crack and Defect Mapping	Close-range photogrammetry	± 0,1–0,3 mm
Verification and Control	Total station GNSS	±1–5 mm





Strategia budowy modeli HBIM z wykorzystaniem TLS/MLS i UAV – opactwo w Sieciechowie

1. Pre-Processing i planowanie

Etap	Działanie	Narzędzia
Inspekcja obiektu i terenu	Identyfikacja stref dla MLS i UAV	GNSS rover, Total Station
Plan nalotu UAV i skanowania TLS/MLS	Definicja siatki UAV i trajektorii MLS	Oprogramowanie do planowania nalotów (DJI Pilot, UgCS)
Rozmieszczenie punktów kontrolnych	Pomiar sieci punktów kontrolnych (GCPs)	RTK-GNSS, pomiary kątowno-liniowe

2. Pozyskiwanie danych

Technologia	Zastosowanie	Narzędzia/Urządzenia
Fotogrametria UAV	Dachy, dziedzińce, punkty niedostępne	DJI M300 RTK + Zenmuse P1 lub Phantom 4 RTK
Mobile Laser Scanning	Powierzchnie wewnętrzne i zewnętrzne na poziomie gruntu	Leica BLK2GO, NavVis VLX, ZEB Horizon
Dodatki TLS	Kluczowe obszary o wysokim poziomie szczegółów (krypty, fasady)	Leica RTC360, Faro Focus 3D

3. Data Processing and Fusion

Etap	Działanie	Oprogramowanie
Rejestracja chmury punktów	Align MLS, TLS and UAV point clouds	Leica Cyclone, Faro Scene, CloudCompare
Przetwarzanie fotogrametryczne	Generate orthoimages, mesh, textures	Agisoft Metashape, Pix4Dmapper
Czyszczenie chmur punktów	Noise removal, classification, decimation	CloudCompare, Autodesk Recap
Generowanie siatki i modeli	Generate 3D mesh for HBIM context	Meshroom, RealityCapture



Solutions for Generating HBIM Using MLS and UAV for Sieciechów Abbey

4. Rozwój modeli HBIM

Cel	Metoda	Platforma
Interaktywna wizualizacja	Praca z modelem w czasie rzeczywistym	Unity3D, Unreal Engine with Revit export
Udostępnianie online	Internetowa przeglądarka modeli	Autodesk BIM360, Sketchfab, WebXR
Integracja VR	Immersyjna interpretacja dziedzictwa	Twinmotion, Enscape, Unity VR

5. Integracja i wizualizacja

Etap	Działanie	Software/Standardy
Modelowanie detali	Konwersja manualna/półautomatyczna do obiektów parametrycznych	Autodesk Revit + Scan-to-BIM plugins
Tworzenie obiektów parametrycznych	Okna, sklepienia, ołtarze, krypty	Revit GDL, Rhino + Grasshopper
Segmentacja modelu	Strukturyzacja - LOD (np. LOD 200–400)	BIM Execution Plan (BEP)
Integracja metadanych	Dane historyczne, materiały, mapowanie uszkodzeń	Revit Properties, IFC tags

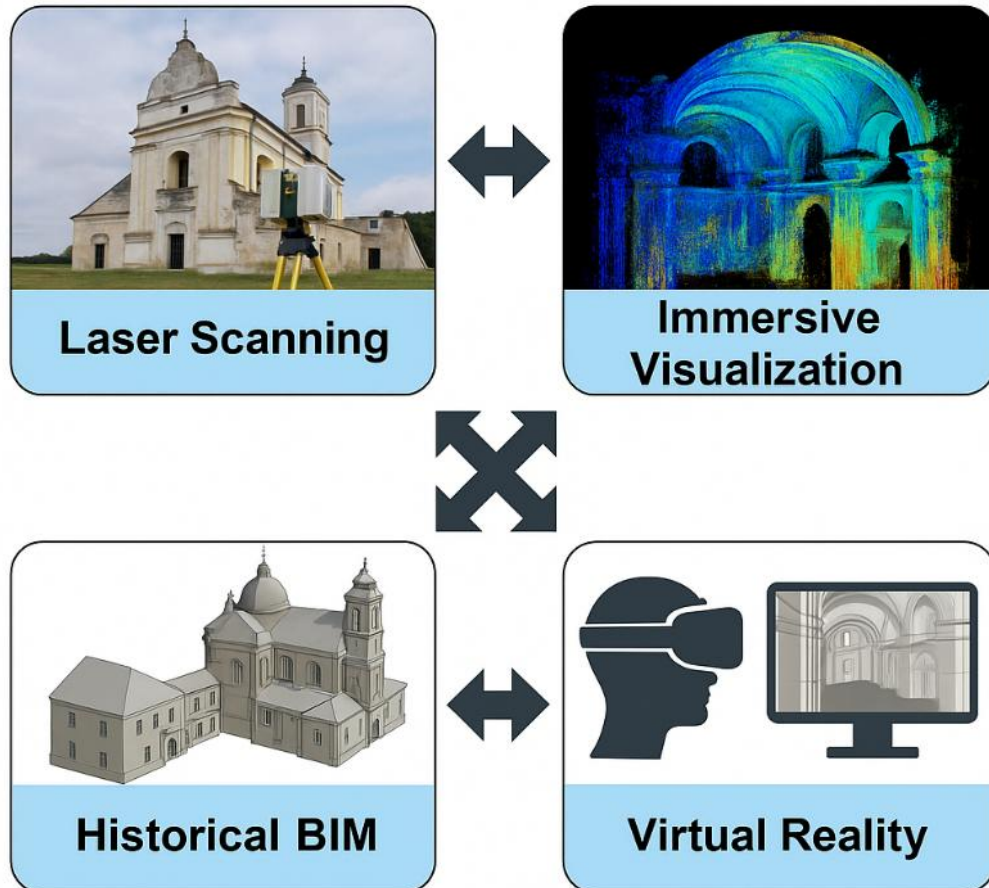


Comparative Summary: HBIM and Laser Scanning for Heritage Conservation

	Sieciechów Abbey HBIM Workflow	ISPRS Paper (Cheng et 2015)
Data Acquisition	TLS, MLS, UAV photogrammetry with mm accuracy	3D laser scanning and tectonic mapping; uti-station
Modeling Approach	Parametric HBIM with historical layers and damage mapping	Point clouds to BIM via tectonic modeling and parametric fitting
Immersive Tech	VR via Cintoo/Unreal Engine for remote access and inspection	Web-based BIM with limited VR functionality
Automation Level	Manual segmentation with potential ML-assisted classification	Material- and shape-based recognition for semi-automated
Monitoring Focus	Repeat scanning, deformation tracking, crack propagation	Long-term documentation, structural changes via periodic scan
Conservation Use	Tiered: 2–10 mm (MLS), <1 mm (TLS, structured light)	Focus on registration and outline extraction, moderate precision
Scalability	Scalable for different heritage sizes	Tested on two small-scale heritage projects (Taj Mahal)



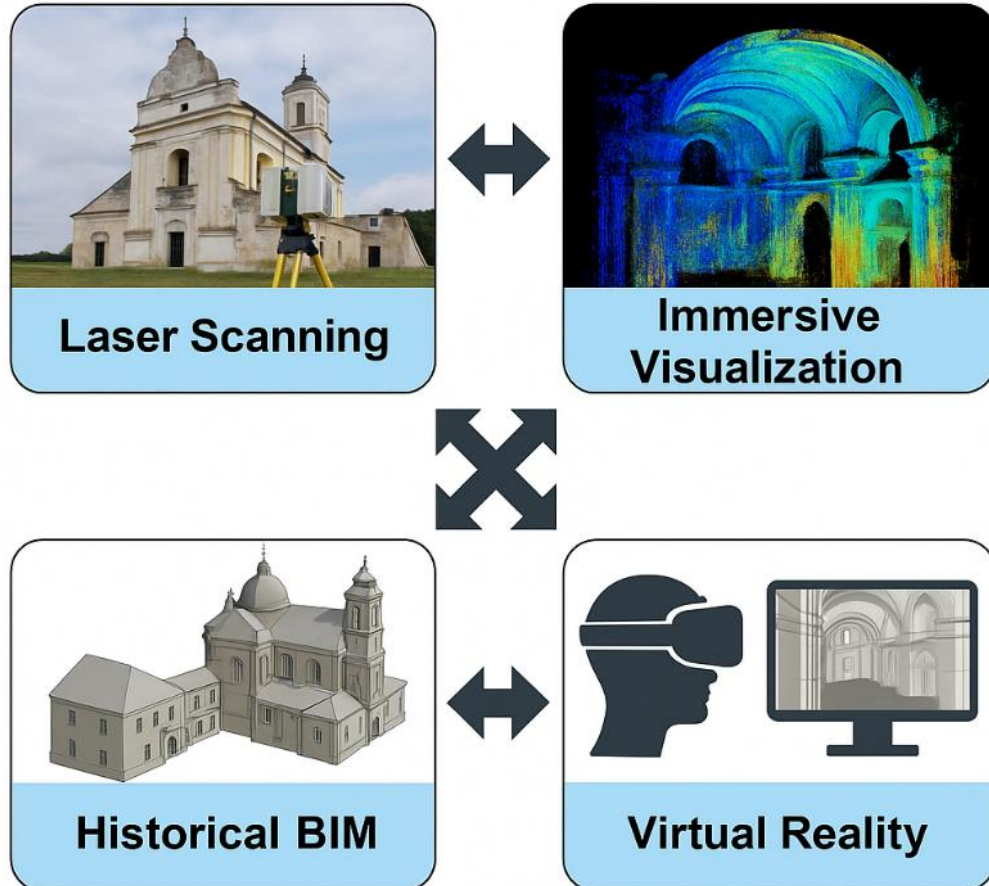
Historical BIM, Immersive Visualization, and Virtual Reality



- **Monitorowanie deformacji: regularnie powtarzane skanowanie UAV + MLS w celu oceny pracy konstrukcji.**
- **Modelowanie stref ryzyka: łączenie HBIM z oprogramowaniem FEM do symulowania odkształceń**
- **Wykorzystanie wykonalności VR do przeprowadzania wirtualnych inspekcji i ocen**



Historical BIM, Immersive Visualization, and Virtual Reality



- **Analiza dokładności:** Zestawienie dokładności metody SLAM z wymaganiami konserwatorskimi (czy szybkość skanowania mobilnego nie odbyła się kosztem precyzji potrzebnej do wykrycia małych pęknięć?)
 - Na podstawie skanu katakumb (z FARO), słabo widać mikropęknięcia. Dobrym uzupełnieniem takiej chmury byłyby wirtualny spacer stworzony na podstawie zdjęć panoramicznych z oznaczaniem np. tagami każdego istotnego ubytku w elewacji.
 - TRU VIEW posiada opcję segregacji tagów kolorystycznie po odpowiedniej kategorii – wtedy kategorią może być wielkość ubytku (szczelina, dziura) lub pomieszczenie/poziom (katakumby, parter, strych).

Najlepiej byłoby skanować skanerem naziemnym – mniej szumów związanych z przemieszczaniem sprzętu pomiarowego. Ale co z warunkami? ...



Wykrywanie pęknięć i strat strukturalnych za pomocą ML

The image displays the Twinsty software interface for structural damage detection. The main view is a 3D perspective of a building's roof, with several orange labels indicating detected issues: "Crack - R1-1" and multiple "Corrosion" labels. A sidebar on the left lists 228 detections, with a filter for "Corrosion" and a list of items with their respective confidence scores and IDs (e.g., "71% Crack R1-1", "45% Crack R1-2", "100% Corrosion R1-3").

A modal window titled "71% Crack detected" is open, allowing the user to "Rate and use AI detection". It features a "True" button (green) and a "Move to Annotations" button. Below the modal, there are thumbnails of the detected crack and a "Show all attached images" link.

Another modal window is open over a 2D aerial view of the roof, showing a grid of 2,002 images. A specific image is selected, and a modal window titled "Use AI detection" is open over it, with a "True" button and a "Move to Annotations" button.

The interface also includes a "Generate Report" button, a user profile icon (AM), and a "3D View" / "Map View" toggle. The bottom right corner shows a 3D view of the building with a list of detections on the right side.



Na podstawie prac wstępnych można wyciągnąć następujące wnioski:

- Umiejętna integracja różnorodnych źródeł danych – MLS + TLS + UAV – dostarcza danych do monitorowania strukturalnego opartego na ML.
- Przetwarzanie i integracja danych pozwalają na działanie w szerokim zakresie dokładności i rozdzielczości.

Postulat: Integracja SLAM + HBIM to przyszłość prewencyjnej konserwacji i monitoringu strukturalnego

Dalsze badania: automatyzacja wykrywania uszkodzeń za pomocą sztucznej inteligencji (AI/Machine Learning) na chmurach punktów oraz integracja z analizami MES (Metoda Elementów Skończonych) – chmura musi być gęsta, bez dziur/ubytków i osadzona w jednolitym układzie współrzędnych.



Dziękujemy!

Krzysztof KARSZNIA, Alicja Dymowska, Krzysztof KSIĄŻEK,
Nataliya KABLAK

Napisz do nas: krzysztof.karsznia@pw.edu.pl