dr hab. inż. Ewelina Kubacka[1)*)]
ORCID: 0000-0003-1727-9143
dr hab. inż. Michał Gołdyn, prof. uczelni[1)]
ORCID: 0000-0002-7791-1940
inż. Jan Pilarski[1)]
ORCID: 0009-0008-8395-2184
inż. Aleksander Gapiński[1)]
ORCID: 0009-0000-5249-9278

Digital transformation of historic urban fabric

Cyfrowa transformacja zabytkowej tkanki miejskiej

DOI: 10.15199/33.2026.10.07

Abstract. The aim of the article is to analyse the challenges associated with the revitalization of nineteenth-century tenement houses, encompassing structural, documentation-related and socio-economic issues. The article describes the use of laser scanning, scan-to-BIM, HBIM and digital twins in diagnostics, design and risk management. It highlights the importance of these tools for cooperation between investors and conservation officers, as well as for planning thermal modernisation in line with climate goals and EU requirements.
Keywords: revitalization; laser scanning; digital twin; HBIM.

Streszczenie. W artykule zaprezentowano analizę wyzwań, związanych z rewitalizacją XIX-wiecznych kamienic, obejmujących zagadnienia konstrukcyjne, dokumentacyjne i społeczno-ekonomiczne. Opisano zastosowanie skanowania laserowego, technologii scan-to-BIM, HBIM i cyfrowych bliźniaków w diagnostyce, projektowaniu oraz zarządzaniu ryzykiem. Podkreślono znaczenie tych narzędzi w przypadku współpracy inwestorów z konserwatorami zabytków i planowania termomodernizacji zgodnej z celami klimatycznymi oraz wymaganiami UE.
Słowa kluczowe: rewitalizacja; skanowanie laserowe; cyfrowy bliźniak; HBIM.

Challenges in managing historic building fabric

The management, maintenance and adaptation of nineteenth-century multi-family residential buildings constitute one of the most complex areas of contemporary civil engineering and urban planning. Historic tenement buildings, which form the core of city centres such as those of Lodz and Krakow, were constructed under different socioeconomic, technological and regulatory conditions to meet the needs of the late nineteenth and early twentieth centuries. Their current technical condition reflects prolonged use, numerous changes in function and often piecemeal repair works. Consequently, it falls short of increasingly stringent requirements for structural safety, energy efficiency, occupant comfort and the preservation of cultural heritage. Contemporary efforts to modernise these buildings and bring them into compliance with current technical and building regulations face numerous interrelated challenges. These encompass both engineering issues, such as complex building geometries, material heterogeneity and uncertainty in data on building structures, and socioeconomic constraints, including owners' limited financial resources, fragmented ownership structures and diverse user needs. As a result, the revitalisation of nineteenth-century tenement buildings involves reconciling multiple, often conflicting requirements. This highlights the need to develop integrated methods for condition assessment, design and management, increasingly supported by digital tools such as BIM/HBIM (Building Information Modelling/Heritage Building Information Modelling), 3D laser scanning and digital models for building life-cycle management.

[1)] Politechnika Łódzka, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska
[*)] Correspondence address: ewelina.kubacka@p.lodz.pl

Wyzwania w zarządzaniu tkanką zabytkową

Zarządzanie, utrzymanie oraz adaptacja XIX-wiecznej wielorodzinnej zabudowy mieszkaniowej stanowi jeden z najbardziej złożonych obszarów współczesnej inżynierii lądowej i urbanistyki. Historyczne kamienice czynszowe, stanowiące trzon centrów miast, takich jak Łódź czy Kraków, powstawały w odmiennych realiach społeczno-gospodarczych, technologicznych i normatywnych, odpowiadając na potrzeby przełomu XIX i XX wieku. Ich obecny stan techniczny jest rezultatem długotrwałej eksploatacji, wielu przekształceń funkcjonalnych oraz często fragmentarycznych działań remontowych. W konsekwencji pozostaje w kolizji z coraz większymi wymaganiami dotyczącymi bezpieczeństwa konstrukcji, efektywności energetycznej, komfortu użytkowania oraz ochrony dziedzictwa kulturowego. Współczesne próby modernizacji i dostosowania tego typu zabudowy do obecnych wymagań techniczno-budowlanych napotykają wiele powiązanych wyzwań. Obejmują one zarówno problemy inżynieryjne, takie jak złożona geometria obiektów, niejednorodność materiałowa czy niepewność danych dotyczących struktury budynków, jak i uwarunkowania ekonomiczno-społeczne, w tym ograniczone zasoby finansowe właścicieli, rozproszone struktury własności oraz zróżnicowane potrzeby użytkowników. W efekcie proces rewitalizacji XIX-wiecznych kamienic staje się polem ścierania się wielu, często sprzecznych wymagań. Uzasadnia to potrzebę rozwijania zintegrowanych metod diagnozy, projektowania i zarządzania, coraz częściej bazujących na narzędziach cyfrowych, takich jak BIM/HBIM (ang. Building Information Modeling/Heritage Building Information Modeling), skanowanie laserowe 3D oraz cyfrowe modele zarządzania cyklem życia obiektów.

Original research paper (Oryginalny artykuł naukowy)

Interrelated factors in condition assessment and revitalisation

A fundamental problem faced by engineers, architects and developers when assessing nineteenth-century buildings is the absence, incompleteness or obsolescence of technical documentation. Even where such documentation exists – usually in the form of fragmentary design drawings or post-war measured surveys – it does not reflect the actual condition of the building. This discrepancy results both from the latitude historically exercised during construction and from decades of changes in function, alterations and physical deterioration. Consequently, building structures are heterogeneous and their actual geometry and arrangement of components often differ from those recorded in archival documentation. An additional challenge is geometric irregularity, including deviations from right angles and vertical alignment, variable wall thicknesses and deformation of timber and ceramic floor structures, including Klein floors. Under these conditions, conventional 2D measured surveys prove insufficient and lead to errors during modelling and design. Geometric and information uncertainty directly hinder the assessment of building condition and structural safety. Nineteenth-century tenement buildings are characterised by pronounced material heterogeneity and are sensitive to changes in loading and environmental conditions. Fired-clay brick masonry laid in lime or clay-lime mortar exhibits limited strength and susceptibility to physicochemical deterioration. Additional loads, resulting, for example, from the addition of storeys or a change of use, lead to the formation of fissures and cracks. The deterioration of floor structures is another significant concern: in timber floors, beam-bearing zones are particularly vulnerable to moisture ingress and biological decay, whereas in Klein floors, corrosion of steel components is a key issue. Stone or brick strip foundations, combined with changes in groundwater and soil conditions, contribute to differential settlement and masonry damage. The technical assessment of these buildings cannot be undertaken in isolation from the socioeconomic conditions that determine the scope for intervention. High modernisation costs, coupled with uncertainty regarding building condition, create substantial investment risk and necessitate contingency allowances, often amounting to 30–50% of the total project cost. This reduces investor interest in the most severely deteriorated buildings, despite their architectural value. At the same time, revitalisation projects entail a risk of gentrification and the displacement of existing residents. The revitalisation of tenement buildings thus reveals strong interdependencies among technical, informational and economic factors and requires an integrated approach.

From a point cloud to a digital twin

The complexity and multidimensional uncertainty associated with the condition assessment and revitalisation of nineteenth-century tenement buildings highlight the limited effectiveness of traditional surveying and analysis methods. To address these limitations, advanced surveying techniques

Zintegrowane uwarunkowania diagnostyki i rewitalizacji

Podstawowym problemem, z jakim mierzą się inżynier, architekt oraz inwestor analizujący obiekt z XIX w, jest brak, fragmentaryczność lub nieaktualność dokumentacji technicznej. W przypadku, gdy nawet istnieje – zwykle w postaci szczątkowych projektów lub powojennych inwentaryzacji – nie odzwierciedla rzeczywistego stanu obiektu. Wynika to zarówno z historycznej swobody wykonawczej, jak i z wieloletnich przekształceń funkcjonalnych, przebudów oraz degradacji technicznej. W efekcie struktura budynków pozostaje niejednorodna, a rzeczywista geometria i układ elementów często odbiegają od zapisów archiwalnych. Dodatkowym utrudnieniem jest nieregularność geometryczna, obejmująca brak kątów prostych, odchylenia od pionu, zmienna grubość murów oraz deformacja stropów drewnianych i ceramicznych (w tym stropów Kleina). W takich warunkach klasyczna inwentaryzacja 2D okazuje się niewystarczająca i prowadzi do błędów na etapie modelowania oraz projektowania. Niepewność geometryczna i informacyjna przekłada się bezpośrednio na trudności w ocenie stanu technicznego i bezpieczeństwa konstrukcji. XIX-wieczne kamienice stanowią układy o dużej niejednorodności materiałowej, wrażliwe na zmiany obciążeń i warunków środowiskowych. Mury z cegły ceramicznej na zaprawach wapiennych lub gliniano-wapiennych cechują się ograniczoną wytrzymałością i podatnością na degradację fizykochemiczną. Dodatkowe obciążenia, np. nadbudowa lub zmiana sposobu użytkowania, prowadzą do powstawania rys i spękań. Istotnym problemem jest także degradacja stropów: w drewnianych szczególnie zagrożone są strefy oparcia belek, podatne na zawilgocenie i destrukcję biologiczną, natomiast w stropach Kleina – korozja elementów stalowych. Posadowienie na ławach kamiennych lub ceglanych, w połączeniu ze zmianami warunków wodno-gruntowych, sprzyja nierównomiernemu osiadaniu i uszkodzeniu murów. Analiza techniczna tych obiektów nie może być prowadzona w oderwaniu od uwarunkowań społecznoekonomicznych, które determinują możliwości interwencji. Duże koszty modernizacji, przy jednoczesnej niepewności stanu technicznego, generują znaczne ryzyko inwestycyjne i konieczność tworzenia rezerw budżetowych, często sięgających 30–50% wartości inwestycji. Ogranicza to zainteresowanie inwestorów najbardziej zdegradowanymi, choć cennymi architektonicznie obiektami. Jednocześnie projekty rewitalizacyjne wiążą się z ryzykiem gentryfikacji i wypierania dotychczasowych mieszkańców. W rezultacie rewitalizacja kamienic ujawnia silne powiązanie między aspektami technicznymi, informacyjnymi i ekonomicznymi i wymaga podejścia zintegrowanego.

Od chmury punktów do cyfrowego bliźniaka

Złożoność oraz wielowymiarowa niepewność związana z diagnostyką i rewitalizacją XIX-wiecznych kamienic wskazują na ograniczoną skuteczność tradycyjnych metod inwentaryzacji i analizy. W odpowiedzi na te ograniczenia stosowana jest integracja zaawansowanych technik pomiarowych i modelowania cyfrowego, umożliwiająca pozyskanie wiarygodnych danych geometrycznych oraz ich bezpośrednie powiązanie z analizą

are integrated with digital modelling, enabling the acquisition of reliable geometric data and their direct integration into structural analysis and decision-making. Overcoming the impasse in the assessment of historic buildings and the design of interventions is made possible by the synergy of terrestrial laser scanning (TLS) [1], close-range photogrammetry, including the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) and parametric building information modelling (BIM), leading to the creation of a digital twin (DT) of a historic building [2, 3]. In this approach, the digital model is not merely a three-dimensional record, but an integrated database of structural, material and operational information that can be used throughout successive stages of the building life cycle – from condition assessment and design to operation and monitoring.

The technological workflow begins with the precise capture of building geometry using laser scanners. Measurements are taken from a dense network of scanning positions covering building interiors, basements, attics, façades and roofs, while UAV photogrammetric surveys are used for parts of the building that are difficult to access. The resulting point clouds are then registered and adjusted to produce **a unified, spatially referenced point cloud** (Figure 1), providing a mathematically faithful representation of the building geometry in its existing condition – the so-called as-is model.



Photo 1. Point cloud of a tenement house in Lodz
Fot. 1. Chmura punktów jednej z łódzkich kamienic

For nineteenth-century buildings, the transition from a point cloud to a BIM model – the scan-to-BIM process – differs from the modelling of newly designed buildings. Standard BIM environments rely on components with idealised, orthogonal geometry and a high degree of repetition. For tenement buildings characterised by irregularities, deformations and deviations from vertical alignment, advanced non-linear modelling strategies are required. These include the use of in-place components, solid modelling based on cross-sections generated from the point cloud and the representation of floor surfaces as shell or topographic elements that account for actual deflections and deformations. These strategies are complemented by the development of dedicated parametric object libraries for historic architectural details, such as cornices, stucco ornamentation, portals and joinery, based on high-resolution survey data. The raw point cloud also serves as a diagnostic tool extending beyond the mere reconstruction of geometry. Geometric non-linearity in masonry structures can be analysed through the mathematical extraction of planes and the generation of deformation maps. Fitting a reference plane to the measured data using the least-squares method enables the creation of three-dimensional hypsometric maps showing deformations, deviations from vertical alignment, advanced non-linear modelling strategies are required. These include the use of in-place components, solid modelling based on cross-sections generated from the point cloud and the representation of floor surfaces as shell or topographic elements that account for actual deflections and deformations. These strategies are complemented by the development of dedicated parametric object libraries for historic architectural details, such as cornices, stucco ornamentation, portals and joinery, based on high-resolution survey data. The raw point cloud also serves as a diagnostic tool extending beyond the mere reconstruction of geometry. Geometric non-linearity in masonry structures can be analysed through the mathematical extraction of planes and the generation of deformation maps. Fitting a reference plane to the measured data using the least-squares method enables the creation of three-dimensional hypsometric maps showing deformations, deviations from vertical alignment, advanced non-linear modelling strategies are required. These include the use of in-place components, solid modelling based on cross-sections generated from the point cloud and the representation of floor surfaces as shell or topographic elements that account for actual deflections and deformations. These strategies are complemented by the development of dedicated parametric object libraries for historic architectural details, such as cornices, stucco ornamentation, portals and joinery, based on high-resolution survey data. The raw point cloud also serves as a diagnostic tool extending beyond the mere reconstruction of geometry. Geometric non-linearity in masonry structures can be analysed through the mathematical extraction of planes and the generation of deformation maps. Fitting a reference plane to the measured data using the least-squares method enables the creation of three-dimensional hypsometric maps showing deformations, devi-

konstrukcyjną i procesem decyzyjnym. Przełamanie impasu w diagnostyce i projektowaniu obiektów historycznych umożliwia synergia naziemnego skanowania laserowego TLS (ang. Terrestrial Laser Scanning) [1], fotogrametrii bliskiego zasięgu, w tym z wykorzystaniem bezzałogowych statków powietrznych UAV (z ang. Unmanned Aerial Vehicle) oraz parametrycznego modelowania informacji o budynku BIM, prowadząca do utworzenia tzw. cyfrowego bliźniaka zabytkowego obiektu DT (ang. Digital Twin) [2, 3]. W takim ujęciu cyfrowy model nie jest jedynie trójwymiarową dokumentacją, lecz zintegrowaną bazą danych konstrukcyjnych, materiałowych i użytkowych, która może być wykorzystywana na kolejnych etapach cyklu życia obiektu – od diagnozy, przez projektowanie, po eksploatację i monitoring.

Proces technologiczny rozpoczyna się od precyzyjnej rejestracji geometrii za pomocą skanerów laserowych. Pomiary prowadzone są z gęstej siatki stanowisk, obejmującej wnętrza lokali, piwnice, poddasza, elewacje oraz dachy, przy czym w przypadku trudno dostępnych fragmentów bryły stosuje się naloty fotogrametryczne UAV. Następnie pozyskane chmury punktów poddaje się procesowi rejestracji i wyrównania, którego rezultatem jest **jednorodna, zorientowana przestrzennie chmura punktów** (fotografia 1), stanowiąca matematycznie wierny zapis geometrii obiektu w stanie istniejącym (tzw. model as-is).

Przejście od chmury punktów do modelu BIM (proces scan-to-BIM) różni się w przypadku obiektów XIX-wiecznych od modelowania budynków nowo projektowanych. Standardowe środowiska BIM operują na komponentach o idealizowanej, ortogonalnej geometrii i wysokim stopniu powtarzalności. W odniesieniu do kamienic, charakteryzujących się nieregularnością, deformacjami i odchyleniami od pionu, konieczne jest zastosowanie zaawansowanych strategii modelowania nieliniowego, obejmujących m.in. wykorzystanie komponentów in-place, modelowanie bryłowe na podstawie przekrojów generowanych z chmury punktów oraz odwzorowanie powierzchni stropów jako elementów powłokowych lub topograficznych, uwzględniających rzeczywiste ugięcia i deformacje. Uzupełnieniem jest tworzenie dedykowanych bibliotek obiektów parametrycznych dotyczących historycznych detali architektonicznych, takich jak gzymsy, sztukaterie, portale czy stolarka, na podstawie wysokorozdzielczych danych pomiarowych. Surowa chmura punktów stanowi przy tym narzędzie diagnostyczne wykraczające poza prostą rekonstrukcję geometrii. Analiza nieliniowości struktur murowych może być prowadzona przez matematyczną ekstrakcję płaszczyzn i generowanie map odkształceń. Dopasowanie płaszczyzny teoretycznej do danych pomiarowych, z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów, umożliwia tworzenie trójwymiarowych map hipsometrycznych obrazujących deformacje, wychylenia od pionu oraz

ations from vertical alignment and local surface discontinuities (Figure 2). This approach enables the non-invasive identification of potential structural damage, such as masonry delamination or zones of stress concentration, before intrusive investigations begin. As a result, **the digital twin becomes not only a documentation tool but also a platform supporting risk assessment and optimisation of the scope of design interventions**.

lokalne zaburzenia ciągłości powierzchni (fotografia 2). Podejście to pozwala na bezinwazyjną identyfikację potencjalnych uszkodzeń konstrukcyjnych, takich jak rozwarstwienie muru czy strefy koncentracji naprężeń, jeszcze przed rozpoczęciem prac odkrywkowych. W rezultacie **cyfrowy bliźniak staje się nie tylko narzędziem dokumentacyjnym, lecz także platformą wspierającą ocenę ryzyka oraz optymalizację zakresu interwencji projektowych.**

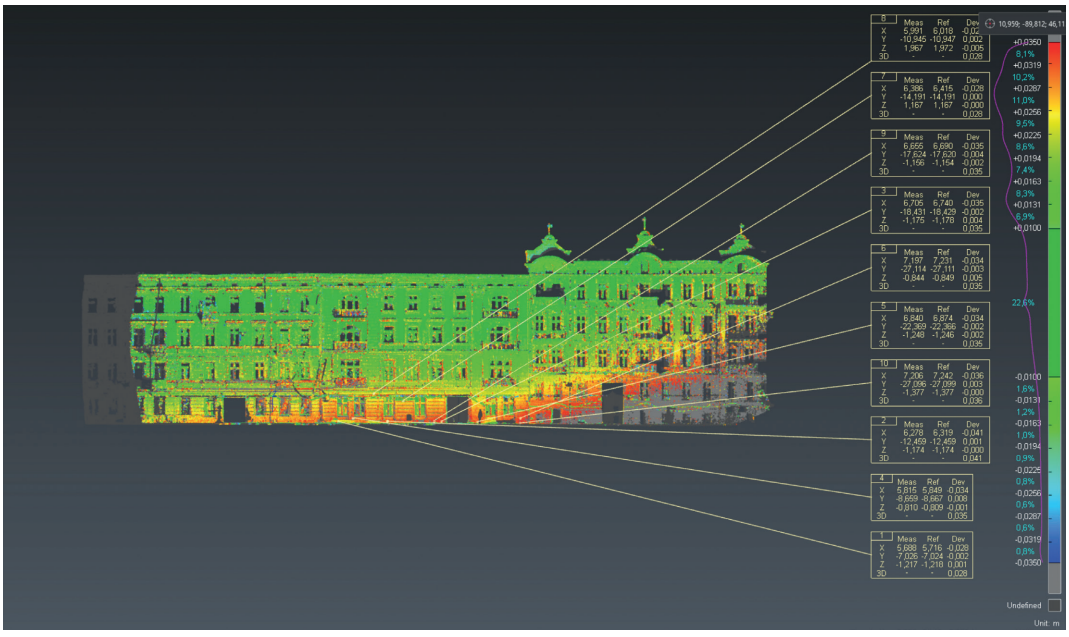


Photo 2. Hypsometric map of the front elevation of tenement houses in Lodz
Fot. 2. Mapa hipsometryczna elewacji frontowej łódzkich kamienic

Comparison of tenement buildings in Lodz and Krakow

A comparative analysis of tenement buildings in Lodz and Krakow shows that the application of scan-to-BIM technology and the digital twin concept reveals distinctive structural and construction characteristics shaped by the historical, economic and geological contexts of the development of the two urban agglomerations. The analysis draws on the authors' own data, collected during projects involving the surveying and monitoring of historic buildings in Lodz and Krakow. The urban fabric of Lodz, shaped by the rapid growth of the textile industry in the nineteenth century, is characterised by large tenement buildings with deep rear wings forming enclosed courtyards, often connected to former industrial buildings. In this context, continuous monitoring using HBIM technology [4, 5] and digital twins becomes one of the few effective methods of safeguarding these buildings, particularly when data management is transferred from paper-based building logbooks to integrated common data environments (CDEs). Krakow exhibits a different pattern in the structure of its historic buildings: nineteenth-century tenement buildings very often resulted from the alteration, vertical extension or amalgamation of earlier Gothic, Renaissance and Baroque buildings, producing a multilayered and highly heterogeneous structural system. Scan-to-BIM surveying reveals pro-

Porównanie kamienic łódzkich i krakowskich

Analiza porównawcza kamienic łódzkich i krakowskich pokazuje, że zastosowanie technologii scan-to-BIM oraz koncepcji cyfrowego bliźniaka ujawnia specyficzne cechy strukturalne i konstrukcyjne, determinowane przez historyczny, ekonomiczny i geologiczny kontekst rozwoju obu aglomeracji. Analiza bazuje na danych własnych, zebranych podczas realizacji projektów inwentaryzacji i monitorowania obiektów zabytkowych w Łodzi oraz Krakowie. Łódzka tkanka miejska, ukształtowana przez gwałtowny rozwój przemysłu włókienniczego w XIX wieku, charakteryzuje się wielkogabarytowymi kamienicami o głębokich traktach oficynowych, tworzących zamknięte podwórza często powiązane z zabudową poprzemysłową. W tym kontekście permanentny monitoring, z wykorzystaniem technologii HBIM [4, 5] i cyfrowych bliźniaków, staje się jedną z nielicznych skutecznych metod ochrony tej zabudowy, szczególnie po przeniesieniu zarządzania danymi z papierowych „Książek Obiektu Budowlanego" do zintegrowanych środowisk CDE (ang. Common Data Environment). Kraków prezentuje odmienny model struktury budynków historycznych: XIX-wieczne kamienice bardzo często stanowią wynik przebudowy, nadbudowy lub scalania wcześniejszych obiektów gotyckich, renesansowych i barokowych, co prowadzi do wielowarstwowej, silnie zróżnicowanej struktury

nounced structural irregularity: as laser scanning progresses from massive stone basement vaults to above-ground storeys with nineteenth-century masonry structures, it documents the continuity of geometric transitions that remain largely indiscernible through visual inspection. This makes it possible to relate the present-day functional and spatial layout to surviving remnants of earlier phases of the building's development, which is crucial both for the design of interventions and for heritage conservation.

Conservation doctrine and investor interests

construction activities involving nineteenth-century residential buildings in Poland are subject to the stringent provisions of the Act on the Protection and Care of Historic Monuments, which has traditionally generated considerable tension in decision-making between investors, designers and heritage conservation authorities. These tensions arise primarily from the lack of objective, unambiguous data on the actual condition of a building and the consequences of proposed interventions. The implementation of an HBIM model and the digital twin concept provides a shared, verified reference platform for all stakeholders and enables decisions to be based on the same consistent data. Conservation doctrine, drawing, among other sources, on the principles of the Venice Charter, requires the utmost respect for original building fabric, in accordance with the principles of primum non nocere (Latin for "first, do no harm") and minimum intervention. The use of non-invasive digital technologies, such as laser scanning, photogrammetry and HBIM modelling, enables detailed condition assessment and the planning of remedial measures while substantially reducing the extent of intrusive investigations and physical intervention in historic fabric. From a commercial investor's perspective, time remains a key economic parameter, while the process of obtaining heritage conservation approvals can be lengthy, involve multiple stages and be subject to the risk of appeals. The submission of a three-dimensional HBIM model supplemented by point cloud analyses enables the precise identification of authentic fabric, the visualisation of proposed building services routes in relation to the existing structure and a reduction in the number of additional expert assessments required by the heritage conservation authority (Figure 3).

As a result, **the digital model shortens administrative and heritage conservation procedures, improves the predictability of project schedules and costs, and facilitates a balance between investor interests and heritage protection requirements**. Investment in advanced structural and digital

konstrukcyjnej. Inwentaryzacja metodą scan-to-BIM ujawnia skrajną nieregularność strukturalną – skaner laserowy, przechodząc od masywnych, kamiennych zasklepień piwnic do nadziemnych kondygnacji z XIX-wiecznym układem murowanym, dokumentuje ciągłość geometrycznych przejść, które pozostają w dużej mierze niewidoczne w obserwacji wizualnej. Dzięki temu możliwe jest powiązanie współczesnego układu funkcjonalno-przestrzennego z zachowanymi reliktami wcześniejszych faz rozwoju obiektu, co ma kluczowe znaczenie zarówno podczas projektowania, jak i ochrony konserwatorskiej.

Doktryna konserwatorska a interes inwestora

Działalność budowlana w obrębie XIX-wiecznej zabudowy mieszkaniowej w Polsce podlega rygorystycznym przepisom Ustawy o ochronie zabytków i opiece nad zabytkami, co tradycyjnie generuje wysoki poziom napięcia decyzyjnego pomiędzy inwestorem, projektantem i konserwatorem zabytków. Źródłem tych napięć jest przede wszystkim brak obiektywnych, jednoznacznych danych o rzeczywistym stanie obiektu oraz o konsekwencjach planowanych ingerencji. Wdrożenie modelu HBIM oraz koncepcji cyfrowego bliźniaka zapewnia wspólną, zweryfikowaną platformę odniesienia dla wszystkich uczestników procesu i umożliwia podejmowanie decyzji na bazie tych samych, spójnych danych. Doktryna konserwatorska, wykorzystująca m.in. założenia Karty Weneckiej, wymaga maksymalnego poszanowania oryginalnej tkanki budowlanej, zgodnie z zasadą primum non nocere (łac. po pierwsze nie szkodzić) i zasadą minimalnej interwencji. Zastosowanie nieinwazyjnych technologii cyfrowych, takich jak skanowanie laserowe, fotogrametria i modelowanie HBIM, pozwala prowadzić pogłębioną diagnozę stanu technicznego oraz planować działania naprawcze przy znacznym ograniczeniu zakresu badań odkrywkowych i fizycznej ingerencji w materiał historyczny. Z perspektywy inwestora komercyjnego czas pozostaje kluczowym parametrem ekonomicznym, a proces uzyskiwania decyzji konserwatorskich bywa długotrwały, wieloetapowy i obarczony ryzykiem odwołań. Przedłożenie trójwymiarowego modelu HBIM, uzupełnionego analizami chmury punktów, umożliwia precyzyjną identyfikację tkanki autentycznej, pokazanie przebiegu projektowanych instalacji w odniesieniu do istniejącej struktury oraz redukcję liczby dodatkowych ekspertyz wymaganych przez konserwatora (fotografia 3).



Photo 3. Simplified photogrammetric model
Fot. 3. Uproszczony model fotogrametryczny

W efekcie **cyfrowy model skraca czas procedur administracyjno-konserwatorskich, zwiększa przewidywalność harmonogramu i kosztów oraz ułatwia wyważenie interesu inwestora i wymagań dotyczących ochrony zabytków**. Inwestycja w zaawansowane rozwiązania

solutions, such as scan-to-BIM, HBIM and structural health monitoring (SHM) systems, therefore represents more than an additional cost: it can be regarded as a means of substantially reducing the financial risk of a project and improving the transparency of the entire process. Developing a digital model of the building as early as the pre-construction assessment stage enables a more accurate estimation of the extent of masonry rebuilding and necessary floor strengthening, as well as the feasibility of routing vertical building services without clashes. This reduces construction uncertainty and facilitates the conclusion of lump-sum contracts with the main contractor, thereby improving the financial predictability of the project and its credibility in the eyes of banks and funding institutions. In turn, this encourages capital allocation towards the most challenging historic building assets.

From HBIM to intelligent energy retrofitting

The historic building revitalisation sector stands on the threshold of the fourth industrial revolution, in which investment and technological development will be driven to a large extent by the need to meet the European Union's climate objectives, including those set out in the European Green Deal and the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD), as well as by the rapid development of artificial intelligence algorithms. At present, transforming point clouds into parametric BIM models requires substantial specialist input, but an increasingly clear trend towards automating this stage using artificial intelligence and machine learning is emerging. Neural networks trained on thousands of samples of historic building geometry can automatically recognise, classify and vectorise building components: distinguish load-bearing walls from partition walls, identify floor beam layouts from minute surface deflections and detect surface damage to masonry materials. The use of such tools can substantially reduce the time required to generate HBIM models and lower the cost of digitising historic building assets, which is particularly important for extensive ensembles of inner-city tenement buildings. One of the key market challenges remains bringing nineteenth-century tenement buildings into line with Environmental, Social and Governance (ESG) standards required by investment funds and financing institutions. These buildings exhibit poor thermal performance, with the thermal transmittance values of building envelope components often several times higher than the limits prescribed by current standards, while their heating systems rely on fossil fuels or inefficient use of electricity. Future investment in this segment will centre on intelligent, deep energy retrofitting guided by advanced HBIM models and digital twins. The need to preserve historic façades often precludes the use of conventional external insulation systems, necessitating complex internal insulation solutions. Designing such solutions without an accurate HBIM model and numerical analyses of heat and moisture transfer risks an uncontrolled shift of the water vapour sat-

konstrukcyjne i cyfrowe, takie jak scan-to-BIM, HBIM oraz systemy monitoringu konstrukcji SHM (ang. Structural Health Monitoring), nie stanowi więc wyłącznie dodatkowego kosztu, lecz może być traktowana jako narzędzie istotnie ograniczające ryzyko finansowe przedsięwzięcia oraz poprawiające transparentność całego procesu. Utworzenie cyfrowego modelu obiektu już na etapie analizy przedwykonawczej pozwala precyzyjniej oszacować zakres przemurowań, koniecznych wzmocnień stropów oraz możliwości bezkolizyjnego prowadzenia pionów instalacyjnych. Zmniejsza to niepewność wykonawczą i ułatwia zawieranie kontraktów z generalnym wykonawcą w formule ryczałtowej, co zwiększa przewidywalność finansową projektu oraz poprawia jego wiarygodność w oczach banków i instytucji finansujących, a tym samym sprzyja kierowaniu kapitału w stronę najbardziej wymagających, historycznych zasobów.

Od HBIM do inteligentnej termomodernizacji

Sektor rewitalizacji obiektów historycznych znajduje się u progu czwartej rewolucji przemysłowej, w której kierunki rozwoju inwestycji i technologii będą w dużej mierze determinowane przez konieczność realizacji celów klimatycznych Unii Europejskiej (m.in. Europejski Zielony Ład oraz dyrektywa EPBD dotycząca efektywności energetycznej budynków) oraz przez dynamiczny rozwój algorytmów sztucznej inteligencji. Obecnie proces transformacji chmury punktów do parametrycznego modelu BIM wymaga znacznego nakładu pracy specjalistów, ale coraz wyraźniej zarysowuje się trend automatyzacji tego etapu z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego. Sieci neuronowe uczone na tysiącach próbek geometrii obiektów historycznych są w stanie automatycznie rozpoznawać, klasyfikować i wektoryzować komponenty budowlane: odróżniać ściany konstrukcyjne od przegród działowych; identyfikować układ belek stropowych na podstawie mikrougięć powierzchni, a także wykrywać uszkodzenia materiałów murowych na poziomie powierzchniowym. Zastosowanie takich narzędzi może istotnie skrócić czas generowania modeli HBIM i zmniejszyć koszty procesu cyfryzacji zabytkowych zasobów, co ma szczególne znaczenie w przypadku rozległych zespołów kamienic śródmiejskich. Jednym z kluczowych wyzwań rynkowych pozostaje dostosowanie XIX-wiecznych kamienic do standardów ESG (ang. Environmental, Social, Governance), wymaganych przez fundusze inwestycyjne i instytucje finansujące. Obiekty te charakteryzują się złą izolacyjnością cieplną, a współczynniki przenikania ciepła przegród często wielokrotnie przekraczają współczesne minima normowe, przy jednoczesnym zastosowaniu systemów ogrzewania, wykorzystujących paliwa kopalne lub nieefektywną energię elektryczną. Przyszłość inwestycyjna w tym segmencie wiąże się z inteligentną, głęboką termomodernizacją sterowaną zaawansowanymi modelami HBIM i cyfrowymi bliźniakami. Ze względu na konieczność ochrony historycznych elewacji, zastosowanie klasycznych systemów ocieplenia zewnętrznego jest w wielu przypadkach niemożliwe, co wymusza stosowanie złożonych układów izolacji od strony wnętrza. Projektowanie takich rozwiązań, bez dokładnego modelu HBIM i analiz numerycznych przepływu ciepła oraz wil-

uration plane into the masonry, resulting in condensation and biological deterioration. BIM models combined with hygrothermal calculations enable the optimal selection of insulation layer thicknesses and configurations. Concurrent integration of the building with Building Energy Management Systems (BEMS) and a digital twin supplied with sensor data on temperature, humidity, CO_2 concentration and service fluid flow rates enables dynamic control of heating and ventilation. This translates into substantial reductions in operating costs and the carbon footprint.

Conclusions

The revitalisation of nineteenth-century residential buildings in Poland presents a complex engineering, conservation and social challenge, as exemplified by the historic tenement buildings of Lodz and Krakow. The traditional approach to managing these processes, based on incomplete data, fragmentary documentation and intuitive repair methods, is no longer effective. With rising investment costs and a high risk of losing authentic historic fabric, continuing to base design decisions on incomplete knowledge is becoming increasingly difficult to justify. The adoption of the scan-to-BIM paradigm and the development of HBIM models establish a new standard of practice in historic building engineering. These technologies enable a transition from approximate assessments to precise analyses of building geometry, deformation and condition. They also provide a shared platform for data exchange between investors, designers and heritage conservation authorities, while supporting systematic planning of modernisation measures, including energy retrofitting and long-term building maintenance. The digital transformation of historic buildings demonstrates that contemporary civil engineering need not conflict with heritage protection. Instead, it can become one of the most effective tools for preserving heritage and ensuring its responsible use under changing social, economic and climatic conditions.

Received: 04.04.2026
Revised: 17.07.2026
Published: 21.10.2026

goci, grozi niekontrolowanym przesunięciem punktu nasycenia pary wodnej do wnętrza muru, kondensacją i rozwojem korozji biologicznej. Modele BIM, w połączeniu z obliczeniami hygrotermicznymi, pozwalają na optymalny dobór grubości i układu warstw izolacyjnych, a jednoczesna integracja budynku z systemami zarządzania energią (BEMS) i cyfrowym bliźniakiem, zasilanym danymi z czujników (temperatura, wilgotność, stężenie CO_2, przepływy mediów), umożliwia dynamiczne sterowanie ogrzewaniem i wentylacją. Przekłada się to na istotną redukcję kosztów eksploatacyjnych oraz śladu węglowego.

Podsumowanie

Rewitalizacja XIX-wiecznej zabudowy mieszkaniowej w Polsce stanowi złożone wyzwanie inżynierskie, konserwatorskie i społeczne, czego przykładem są historyczne kamienice Łodzi i Krakowa. Tradycyjne podejście do zarządzania tymi procesami, z wykorzystaniem niekompletnych danych, fragmentarycznej dokumentacji i intuicyjnych metod naprawczych, przestało być skuteczne. W warunkach zwiększających się kosztów inwestycyjnych oraz wysokiego ryzyka utraty autentycznej substancji zabytkowej dalsze opieranie decyzji projektowych na niepełnej wiedzy staje się rozwiązaniem trudnym do zaakceptowania. Wdrożenie paradygmatu scan-to-BIM oraz rozwój modeli HBIM wyznaczają nowy standard postępowania w inżynierii obiektów historycznych. Technologie te umożliwiają przejście od szacunkowych ocen do precyzyjnych analiz geometrii, deformacji i stanu technicznego obiektu i tworzą wspólną platformę wymiany danych pomiędzy inwestorem, projektantem i konserwatorem zabytków oraz wspierają racjonalne planowanie działań modernizacyjnych, w tym termomodernizacji i długoterminowego utrzymania budynku. Cyfrowa transformacja zabytków pokazuje, że nowoczesna inżynieria lądowa nie musi pozostawać w sprzeczności z ochroną dziedzictwa, lecz może stać się jednym z najskuteczniejszych narzędzi jego zachowania i odpowiedzialnego wykorzystania w zmieniających się warunkach społecznych, gospodarczych i klimatycznych.

Artykuł wpłynął do redakcji: 04.04.2026 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 17.07.2026 r.
Opublikowano: 21.10.2026 r.

Literature

[1] Kubacka E, Kotarski A, Gapiński A, Pilarski J, Woźniak S, Wójcik J, Zychowicz Ł. Analysis of effectiveness of using 3D scanners in preparation of architectural and construction documentation: case study of historic building. Int. J. Conserv. Sci. 2025; https://doi.org/10.36868/IJCS.2025.si.08.

[2] Vuoto A, Funari M, Lourenço P. Shaping digital twin concept for built cultural heritage conservation: a systematic literature review. Int. J. Archit. Herit. 2024; https://doi.org/10.1080/15583058.2023.2258084.

[3] Płaszczyk T, Korus K, Uściłowski M. Cyfryzacja procesów utrzymania obiektów infrastruktury. Materiały Budowlane 2021; https://doi.org/10.15199/33.2021.06.04.

[4] Banfi F, Liu W. The state of HBIM in digital heritage: a critical and bibliometric assessment of six emerging frontiers (2015–2025). Appl. Sci. 2026; https://doi.org/10.3390/app16020906.

[5] Sztwiertnia D, Ochałek A, Tama A, Lewińska P. HBIM (heritage building information modell) of the Wang Stave Church in Karpacz – case study. Int. J. Archit. Herit. 2019; https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1645238.