



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

NAUKI INŻYNIERYJNO - TECHNICZNE

INŻYNIERIA LĄDOWA, GEODEZJA I TRANSPORT

ROZPRAWA DOKTORSKA

Badania nad wsparciem budowlanego procesu inwestycyjnego realizowanego w standardach otwartych BIM: opracowanie i implementacja rozwiązań wspierających obsługę inwestycji

Autor: Szymon Glinka

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Tomasz Owerko, prof. uczelni

Praca wykonana: Akademia Górniczo – Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska

Kraków, 2024

*Pragnę serdecznie podziękować
Panu Profesorowi Tomaszowi Owerce
za opiekę i cenne wskazówki
udzielone w trakcie pisania rozprawy.*

*Ponadto dziękuję najbliższym,
w szczególności,
żonie Marcie, córkom Zosi i Klarze
za cierpliwość i wyrozumiałość
podczas realizacji badań.*

SPIS TREŚCI

SPIS TREŚCI 4

CZĘŚĆ WSTĘPNA.....	7
I.1 Indeks skrótów	7
I.2 Streszczenie w języku polskim	8
I.3 Streszczenie w języku angielskim.....	9
I.4 Cele i hipotezy badawcze.....	10
I.4.1 Cel pracy	10
I.4.2 Teza badawcza	10
I.5 Zakres pracy	11
I.5.1 Problematyka związana z dyscypliną naukową ILGiT.....	11
I.5.2 Problematyka związana z dyscypliną naukową NoZiJ	12
I.5.3 Problematyka związana z dyscypliną naukową ITiT.....	13
I.6 Metodyka badawcza.....	13
I.7 Struktura pracy	13
ROZDZIAŁ II. Problematyka	15
II.1 Wprowadzenie.....	15
II.2 Opis problemów badawczych	17
ROZDZIAŁ III. Cyfrowe dane budowlane i geoprzestrzenne.....	19
III.1 Budowlany proces inwestycyjny oraz BIM.....	19
III.1.1 Potrzeba zmian.....	19
III.1.2 Charakterystyka domeny budowlanej w ujęciu cyfrowych danych budowlanych	20
III.1.2.1 Aspekty zarządcze budowlanego procesu inwestycyjnego.....	20
III.1.2.2 Budowlany proces inwestycyjny.....	22
III.1.2.3 Cyfryzacja budowlanego procesu inwestycyjnego oraz stosowane standardy.....	27
III.1.3 Formaty i standardy dotyczące danych w metodyce BIM.....	34
III.1.3.1 Otwarte standardy BIM.....	34
III.1.3.2 Poziomy szczegółowości informacyjnej oraz geometrycznej.....	40
III.1.4 Synteza – zarządzanie informacją w BIM	41
III.2 Budowlany proces inwestycyjny w ujęciu domeny geoprzestrzennej....	42
III.2.1 Charakterystyka domeny geoprzestrzennej w ujęciu cyfrowych danych geoprzestrzennych	42
III.2.1.1 Systemy Informacji Geograficznej - Geographic Information System (GIS).....	43
III.2.1.2 Budowlany proces inwestycyjny – dane oraz produkty geodezyjne.....	46
III.2.1.3 Wpływ cyfryzacji i transformacji technologicznej na realizację zadań związanych z Geodezyjną Obsługą Inwestycji.....	47

III.2.2	Metody zapisu cyfrowych danych geoprzestrzennych	50
III.3	Cyfrowe dane budowlane oraz cyfrowe dane geoprzestrzenne.....	52
III.3.1	Interoperacyjność domeny budowlanej oraz geoprzestrzennej	52
III.3.2	Integracja cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych.....	56
III.3.2.1	Metody realizacji procesów łączenia i konwersji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych	56
III.3.2.2	Georeferencja danych	60
III.3.2.3	Wykorzystywane technologie w rozwiązaniach integrujących cyfrowe dane budowlane oraz geoprzestrzenne	62
III.3.2.4	Obszary zastosowań integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych.....	65
III.3.2.5	Analiza SWOT.....	68
ROZDZIAŁ IV. Proces integracji cyfrowych danych geoprzestrzennych oraz budowlanych 70		
IV.1	Zidentyfikowane przykłady zastosowania integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych	70
IV.2	Uogólniony opis procesu integracji danych domeny budowlanej oraz geoprzestrzennej.....	81
IV.2.1	Uogólniony schemat integracji cyfrowych danych geoprzestrzennych oraz budowlanych	81
IV.2.2	Integracja cyfrowych danych geoprzestrzennych oraz budowlanych w nawiązaniu do standardów otwartych	85
IV.3	Rozwiązania technologiczne (stos technologiczny)	87
IV.4	Georeferencja w BIM	88
IV.5	Reprezentacja geometryczna – charakterystyka standardów otwartych dla cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych	93
IV.5.1	IFC - reprezentacja CSG, BRep, SweptSolid	94
IV.5.2	IFC - reprezentacja powiązana z osią obiektu infrastrukturalnego... ..	100
IV.5.3	Cyfrowe dane geoprzestrzenne – charakterystyka reprezentacji geometrycznej.....	105
IV.6	Dane alfanumeryczne i metadane w kontekście cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych	107
IV.7	Praktyczne podejścia do łączenia oraz konwersji cyfrowych danych geoprzestrzennych i budowlanych.....	110
ROZDZIAŁ V. Implementacja cyfrowych narzędzi wspierających Geodezyjną Obsługę Inwestycji realizowanej w technologii standardów otwartych BIM 115		
V.1.1	Nadanie, weryfikacja bądź poprawa georeferencji plików IFC.....	115
V.1.2	Wykorzystanie danych otwartych do wsparcia podejmowania decyzji w początkowych fazach inwestycji oraz jako baza do prac koncepcyjnych... ..	121
V.1.3	Wykrycie i przeprowadzenie analizy potencjalnych kolizji na podstawie cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych (kolizje zewnętrzne)	123

V.1.4	Wsparcie procesu wyceny inwestycji poprzez połączenie cyfrowych danych budowlanych z danymi geoprzestrzennymi	126
V.1.5	Wsparcie prac koncepcyjnych oraz projektowych poprzez konwersję cyfrowych danych geoprzestrzennych do formatu IFC (cyfrowych danych budowlanych).....	129
V.1.6	Automatyzacja pozyskiwania danych do tyczenia obiektu dla wsparcia zadań inżyniera geodety	133
V.1.7	Analiza postępu prac budowlanych poprzez połączenie cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych	139
V.2	Optymalizacja budowlanego procesu inwestycyjnego realizowanego w technologii BIM	145
ROZDZIAŁ VI. Wnioski		148
ROZDZIAŁ VII. Podsumowanie.....		154
VII.1	Podsumowanie	154
VII.2	Plany na przyszłość	155
Bibliografia	159	
Spis tabel	168	
Spis rysunków	169	

CZĘŚĆ WSTĘPNA

I.1 Indeks skrótów

ADE	Application Domain Extension	PGiK	Prawo Geodezyjne i Kartograficzne
AEC	Architecture, Engineering & Construction	PZP	Prawo Zamówień Publicznych
AIR	Asset Information Requirements	SQL	Structured Query Language
API	Application Programming Interface	TIDP	Task Information Delivery Plan
BDOT	Baza Danych Obiektów Topograficznych	TOTEX	TOTAL EXpenditure
BEP	BIM Execution Plan	UML	Unified Modeling Language
BIM	Building Information Modelling	VDC	Virtual Design Construction
BPMN	Business Process Modeling Notation	WBS	Work Breakdown Structure
BRRep	Boundary Representation	WCS	Web Coverage Service
bSDD	buildingSMART Data Dictionary	WFS	Web Feature Service
BSL	Bezzałogowe Statki Latające	WKT	Well Known Text
CAD	Computer Aided Design	WMS	Web Map Service
CAPEX	CAPital EXpenditures	XML	Extensible Markup Language
CDE	Common Data Environment		
CIM	City Information Model		
CSG	Constructive Solid Geometry		
CSW	Catalog Service for Web		
EGiB	Ewidencja Gruntów i Budynków		
EIR	Exchange Information Requirements		
EPSG	European Petroleum Survey Group		
ERJU	Europe's Rail Joint Undertaking		
ETL	Extract Translate Load		
GESUT	Geodezyjna Ewidencja Sieci Uzbrojenia Terenu		
GIS	Geographic Information System		
GML	Geography Markup Language		
GOI	Geodezyjna Obsługa Inwestycji		
GPS	Global Positioning System		
GPR	Ground Penetrating Radar		
ICE	Integrated Concurrent Engineering		
JSON	JavaScript Object Notation		
IFD	Integrated Framework Dictionary		
IDM	Information Delivery Manual		
IDS	Information Delivery Specification		
IFC	Industry Foundation Classes		
ILGiT	Inżynieria Lądowa Geodezja i Transport		
IPD	Integrated Product Delivery		
ISO	International Organization for Standardization		
ITiT	Informatyka Techniczna i Telekomunikacja		
LCA	Life Cycle Assessment		
LOA	Level of Accuracy		
LOD	Level of Detail		
LOI	Level of Information		
LOIN	Level of Information Need		
MDCP	Mapa do Celów Projektowych		
MIDP	Master Information Delivery Plan		
MVD	Model View Definiton		
NoZiJ	Nauki o Zarządzaniu i Jakości		
OGC	Open Geospatial Consortium		
OPEX	OPerating EXpenditures		
OWL	Web Ontology Language		
PDF	Portable Document Format		
PIR	Project Information Requirements		
PIM	Project Information Model		

I.2 Streszczenie w języku polskim

Z uwagi na problemy z produktywnością, współczesny sektor budowlany stoi przed wyzwaniami związanymi z koniecznością podniesienia efektywności. Ponadto, transformacja cyfrowa staje się niezbędnym krokiem w celu poprawy zarządzania projektami czy procesami dla celów np. lepszego wykorzystania zasobów i zarządzania informacją. Jednym z kluczowych elementów tej transformacji jest zastosowanie innowacyjnych rozwiązań cyfrowych, umożliwiających m.in. wykorzystanie potencjału związanego z integracją cyfrowych danych geoprzestrzennych oraz budowlanych.

Interoperacyjność pomiędzy cyfrowymi danymi geoprzestrzennymi i budowlanymi stanowi istotne wyzwanie w kontekście integracji. Problemy z łączeniem czy konwersją danych oraz współdzieleniem procesów wynikają głównie z braku spójnych standardów, różnic w taksonomii czy w podejściu do fundamentalnych założeń w obu domenach. Z tego też względu istnieje pilna potrzeba opracowania algorytmów oraz cyfrowych narzędzi wspierających integrację cyfrowych danych geoprzestrzennych oraz budowlanych, opartych na standardach otwartych, które umożliwią obniżenie progu wejścia do technologii oraz przyczynią się do demokratyzacji danych, zwiększając dostępność i efektywność działań w budowlanym procesie inwestycyjnym. Ponadto, co równie istotne, transformacja cyfrowa znacząco wpływa na zmiany w interakcji pomiędzy domenami, w tym m.in. zadaniami związanymi z Geodezyjną Obsługą Inwestycji.

W ramach pracy opracowano i zaimplementowano algorytmy w formie modułów, wspierające integrację cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych. W szczególności skupiono się na aspektach związanych z georeferencją, przetwarzaniem geometrii pomiędzy domenami np. z formatu IFC do reprezentacji jawnej stosowanej w domenie geoprzestrzennej czy też z domeny geoprzestrzennej do formatu IFC. Ponadto zaprezentowano różne możliwości zapisu danych (różne formaty danych) np. w postaci przestrzennej bazy danych PostGIS. Dodatkowo opracowano i zaimplementowano algorytmy umożliwiające analizę danych czy też ich pozyskiwanie z zasobów otwartych. Na podstawie powyższych zaimplementowano cyfrowe narzędzia wspierające, które pozwalają na realizację przykładowych zastosowań, w obszarze wsparcia działań interesariuszy, w szczególności, inżyniera geodety realizującego zadania w ramach Geodezyjnej Obsługi Inwestycji. Rezultatem tych prac jest praktyczne przedstawienie efektów działania opracowanych rozwiązań na danych testowych.

Wnioski jakie płyną z realizacji niniejszej pracy doktorskiej, to przede wszystkim możliwość wsparcia budowlanych procesów inwestycyjnych realizowanych z wykorzystaniem standardów otwartych BIM poprzez opracowanie i implementację algorytmów, a na ich bazie cyfrowych narzędzi wspierających umożliwiających integrację cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych.

Opracowane i zaimplementowane w ramach pracy algorytmy stanowią podstawę do dalszego rozwoju dyscypliny. Dają one możliwość usprawnienia i optymalizacji budowlanego procesu inwestycyjnego na podstawie opracowanych algorytmów oraz zdefiniowanych przykładów zastosowania. Ponadto, możliwa jest implementacja pozostałych zidentyfikowanych przykładów zastosowania z wykorzystaniem otwartych standardów, co otwiera nowe perspektywy badawcze i praktyczne. Jednakże w celu praktycznej implementacji wymagane są zmiany na różnych płaszczyznach związanych z m.in. nowelizacją aktów prawnych, sporządzeniem wytycznych czy standardów, zwiększaniem świadomości korzyści stosowania zintegrowanych rozwiązań wśród decydentów oraz podnoszeniem kompetencji poszczególnych interesariuszy budowlanego procesu inwestycyjnego w obszarze stosowania nowych rozwiązań cyfrowych.

I.3 Streszczenie w języku angielskim

Due to productivity challenges, the modern construction sector faces the necessity of improving its efficiency. Moreover, digital transformation has become an essential step towards enhancing project and process management, for example, through better resource utilization and information management. One of the key elements of this transformation is the implementation of innovative digital solutions, enabling, among other things, the potential related to the integration of digital geospatial and construction data.

Interoperability between digital geospatial and construction data presents a significant challenge in the context of integration. Issues with data merging, conversion, and process sharing are caused mainly by the lack of consistent standards, differences in taxonomy, and various approaches to fundamental principles in both domains. As a result, there is an urgent need to develop algorithms and digital enablers that support the integration of geospatial and construction data, based on open standards. These tools would lower the entry barriers to the technology and contribute to the democratization of data, enhancing accessibility and efficiency in the construction investment process. Additionally, and equally important, digital transformation is profoundly impacting the interaction between these domains, including tasks related to Geodetic Investment Service.

As part of this work, algorithms were developed and implemented in the form of modules to support the integration of digital construction and geospatial data. The focus was primarily on aspects related to georeferencing, processing geometry between domains, such as converting from the IFC format to the explicit representations used in the geospatial domain, or vice versa from the geospatial domain to the IFC format, as well as managing alphanumeric data. Additionally, various data storage options (different data formats) were explored, such as using the PostGIS spatial database. Algorithms were also developed and implemented for data analysis and acquisition from open resources. Based on these developments, supporting digital enablers were implemented, enabling the execution of sample applications in the area of support for geodetic engineers performing tasks within the framework of Geodetic Investment Service. The result of this work is a practical demonstration of the functionality of the developed solutions using test data.

The conclusions drawn from this doctoral thesis primarily highlight the potential to support construction investment processes using open BIM standards through the development and implementation of algorithms. These algorithms have formed the basis for digital enablers that facilitate the integration of digital construction and geospatial data, enhancing the efficiency and effectiveness of these processes.

The algorithms developed and implemented in this work lay the foundation for further advancement of the discipline. They offer the potential to improve and optimize construction investment processes based on the established algorithms and defined use cases. Additionally, the implementation of other identified use cases using open standards is possible, which opens new research and practical opportunities. However, for practical implementation, changes are required at various levels. They should include the amendment of legal regulations, the preparation of guidelines and standards, raising awareness of the benefits of integrated solutions among decision-makers, and enhancing the competencies of various stakeholders in the construction investment process regarding the use of new digital solutions.

I.4 Cele i hipotezy badawcze

I.4.1 Cel pracy

Głównym celem pracy jest opracowanie algorytmów oraz implementacja prototypów cyfrowych narzędzi wspierających (*ang. digital enablers*) umożliwiających integrację cyfrowych danych budowlanych i geoprzestrzennych dla celu wsparcia procesów w obszarach zachodzących interakcji pomiędzy domenami budowlaną oraz geoprzestrzenną w budowlanym procesie inwestycyjnym realizowanym w technologii Building Information Modeling (BIM) na bazie standardów otwartych.

Ponadto postawiono cel pomocniczy, w niniejszej pracy traktowany jako krok pośredni, dotyczący przedstawienia charakterystyki obu domen (budowlanej oraz geoprzestrzennej) w odniesieniu do danych cyfrowych, a także opracowania takich metod i algorytmów integracji cyfrowych danych geoprzestrzennych oraz budowlanych, które wraz z praktyczną implementacją oraz opisem przykładów zastosowania, mogą zostać wykorzystane jako źródło wiedzy i podstawa technologiczna w budowlanym procesie inwestycyjnym realizowanym w technologii BIM. Głównymi beneficjentami prac mogą być inżynierowie geodeci, w obszarze wsparcia zadań podczas Geodezyjnej Obsługi Inwestycji (GOI) realizowanej z wykorzystaniem metodyki BIM, geoinformatycy wspierający proces inwestycyjny w zakresie analizy danych geoprzestrzennych, jak również BIM Koordynatorzy w obszarze analizy i koordynacji zarządzania informacją cyfrową w celu zapewnienia jakości procesów. Ponadto praca może być wartościowa z punktu widzenia BIM Menadżerów w szczególności w obszarze wymagań informacyjnych i budowy strategii zarządzania informacją.

I.4.2 Teza badawcza

W ramach pracy zostanie zweryfikowana następująca teza:

- Opracowanie algorytmów i implementacja cyfrowych narzędzi wspierających, bazujących na standardach otwartych, do realizacji procesów integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych, umożliwia wsparcie budowlanych procesów inwestycyjnych realizowanych w technologii BIM.

Ponadto, zidentyfikowano następujące pytania badawcze, które posłużyły do wykazania tezy:

- Czy możliwe jest stworzenie zbioru narzędzi wspierających inżyniera realizującego inwestycję prowadzoną w technologii BIM z wykorzystaniem standardów otwartych?
- Czy możliwe jest opracowanie i implementacja algorytmów oraz metod pozwalających na wszechstronną integrację cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych?
- Czy możliwa jest realizacja postulatu jednego źródła informacji oraz demokratyzacji danych w obszarze integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych w budowlanym procesie inwestycyjnym?
- Czy możliwe jest opracowanie cyfrowych narzędzi wspierających inżyniera geodetę realizującego zadania w ramach Geodezyjnej Obsługi Inwestycji prowadzonej w technologii BIM z wykorzystaniem standardów otwartych?

I.5 Zakres pracy

Podjęmowana problematyka w ramach niniejszej pracy dotyczy zarówno analiz teoretycznych jak i opracowania algorytmów oraz implementacji cyfrowych narzędzi wspierających, bazujących na standardach otwartych, do realizacji procesów integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych umożliwiających optymalizację działań, zapewnienie jakości i obniżenie ryzyka budowlanych procesów inwestycyjnych realizowanych w technologii BIM. Ponadto zweryfikowany zostanie obszar wsparcia prac interesariuszy, w szczególności inżynierów geodetów realizujących zadania w ramach Geodezyjnej Obsługi Inwestycji poprzez zastosowanie wypracowanych rozwiązań.

Tematyka ta jest szczególnie istotna ze względu na postęp technologiczny, proces cyfryzacji oraz próby zwiększenia produktywności sektora budowlanego. Cyfryzacja dotyczy przede wszystkim zmian w podejściu do zarządzania informacją w budowlanym procesie inwestycyjnym, które są determinowane przez implementację metodyki BIM. W połączeniu z cyfrowymi danymi geoprzestrzennymi, może to pozwolić na uzyskanie efektu synergii, prowadząc do bardziej efektywnego i zintegrowanego zarządzania projektami budowlanymi.

Jednakże w trakcie prac zidentyfikowano istotne ograniczenia w zakresie możliwości bezpośredniej integracji danych i procesów pomiędzy domenami budowlaną oraz geoprzestrzenną, wynikające z niedostatków w następujących obszarach:

- interoperacyjności obu domen,
- liczbie dostępnych algorytmów oraz rozwiązań implementujących cyfrowe narzędzia wspierające bazujących na standardach otwartych,
- opisie przykładów zastosowań wraz z definicją wymagań informacyjnych oraz technologicznych,
- podejść do zarządzania informacją podczas interakcji pomiędzy domenami.

W celu budowy komplementarnych rozwiązań wymagane jest więc podejście interdyscyplinarne bazujące na elementach z trzech różnych dyscyplin naukowych: inżynieria lądowa, geodezja i transport (ILGiT), nauki o zarządzaniu i jakości (NoZiJ) oraz informatyka techniczna i telekomunikacja (ITiT). Poniżej zostały opisane obszary każdej z dyscyplin, które zostały włączone do pracy. Należy jednak zaznaczyć, że w zdecydowanej większości praca jest realizowana w obszarze ILGiT, którą autor identyfikuje jako wiodącą.

I.5.1 Problematyka związana z dyscypliną naukową ILGiT

Dyscyplina naukowa ILGiT zawiera w sobie zarówno obszary naukowe dotyczące domeny geoprzestrzennej jak i budowlanej, jest to więc dziedzina, którą wprost można opisać badania dotyczące interakcji pomiędzy cyfrowymi danymi budowlanymi oraz geoprzestrzennymi.

Ze względu na cyfryzację i postęp technologiczny oraz implementację metodyki BIM do zarządzania cyfrową informacją w budowlanych procesach inwestycyjnych, powinna nastąpić zmiana w stosowanym dotychczas podejściu, w tym wykorzystywanych procedurach czy procesach. Następuje również ewolucja w rolach i zadaniach w budowlanym procesie inwestycyjnym, która dotyczy inżynierów np. geodetów realizujących zadania związane z Geodezyjną Obsługą Inwestycji. Dodatkowo, dla zapewnienia prawidłowej realizacji zadań oraz zwiększenia efektywności, zarówno BIM Koordynatorzy, BIM Menedżerowie, jak

i jednostki organizacyjne (np. przedsiębiorstwa) powinny być świadome wymagań informacyjnych związanych z integracją cyfrowych danych budowlanych i geoprzestrzennych, a także korzyści wynikających ze wspólnego rozpatrywania i analizowania danych z obu domen.

W pracy zostały opisane kwestie dotyczące integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych. W szczególności opisano: charakterystykę obu domen i stosowane standardy, możliwe metody i podejścia do integracji wraz z obszerną charakterystyką, stosowane reprezentacje geometryczne w obu domenach czy podejścia do georeferencji, jako krytyczny element determinujący możliwość integracji. Ponadto w toku prac opracowano algorytmy w formie modułów umożliwiające elastyczne podejście do integracji cyfrowych danych geoprzestrzennych i budowlanych. Przeanalizowano także zmiany wynikające z cyfryzacji, w tym analizę zmian w zadaniach inżyniera geodety w ramach metodyki BIM. Oprócz tego podczas realizacji prac zidentyfikowano przykłady zastosowania oraz zaimplementowano cyfrowe narzędzia wspierające realizację różnych scenariuszy zastosowania.

Należy jednak zaznaczyć, że w pracy nie skupiono się na technicznych aspektach związanych z projektowaniem czy budową obiektów, w tym analizie oprogramowania komercyjnego do modelowania informacji. Analizowane są w głównej mierze te aspekty, które pośrednio lub bezpośrednio dotyczą cyfrowych danych geoprzestrzennych w odniesieniu do standardów otwartych.

1.5.2 Problematyka związana z dyscypliną naukową NoZiJ

Aspekty zarządcze i organizacyjne stanowią istotny element z punktu widzenia przede wszystkim podmiotów działających w ramach otoczenia społeczno-gospodarczego. Proces integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych wymaga dostosowania organizacji do nowych procesów. Procesy te powinny więc być, przynajmniej w jakimś stopniu, ustandaryzowane, ponieważ wpływają one na codzienne realizacje prac. W zależności od typu interesariusza, wpływ tych procesów będzie różny, jednakże patrząc z perspektywy budowlanych procesów inwestycyjnych, gdzie powinna następować współpraca pomiędzy poszczególnymi podmiotami, należy dążyć do uzyskania efektów synergii poprzez współdziałanie na wielu polach. W ramach BIM i definicji np. wymagań informacyjnych, podczas procesów integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych powstaje interakcja, która musi również być przeanalizowana, szczególnie patrząc przez pryzmat korzyści (opisanych również w ramach niniejszej pracy). Ponadto nowoczesne metodyki zarządzania projektami/procesami również mogą stanowić szansę, a integracja cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych może spowodować zwiększenie efektywności działalności operacyjnej poszczególnych podmiotów.

W pracy zostały opisane podejścia do integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych wraz ze schematycznym opisem oraz założeniami i wytycznymi dotyczącymi m.in. wymagań informacyjnych. Ponadto opracowano listę przykładów zastosowania, która może być wykorzystywana jako element wsparcia podczas budowy strategii dotyczących działań w projektach, w szczególności dla celów obsługi różnych przypadków użycia oraz korzyści biznesowych z tego wynikających.

I.5.3 Problematyka związana z dyscypliną naukową ITiT

Ostatni obszar obejmuje rozwój oprogramowania w ramach dziedziny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja. W trakcie realizacji badań i prac stworzono setki tysięcy linii kodu, które były niezbędne do prototypowania, testowania oraz opracowywania algorytmów umożliwiających integrację cyfrowych danych budowlanych i geoprzestrzennych. Konieczność tych działań wynika z istotnych braków w istniejących rozwiązaniach, zarówno komercyjnych, jak i dostępnych w trybie otwartym.

I.6 Metodyka badawcza

Realizacja prac opierała się przede wszystkim na prototypowaniu narzędzi służących rozwiązaniu problemów związanych z integracją cyfrowych danych budowlanych i geoprzestrzennych. Przedstawiona metodyka stanowi ogólny zarys podejścia badawczego.

Ze względu na charakter prac, które obejmowały rozwiązywanie różnorodnych zdefiniowanych problemów, w każdym przypadku zastosowano zbliżone metody. Polegały one na wykorzystaniu narzędzi programistycznych do implementacji algorytmów oraz cyfrowych narzędzi wspierających poprzez przyrostowe opracowanie poszczególnych funkcjonalności. Holistycznie patrząc, proces ten składał się z analizy problemu, opracowania odpowiednich algorytmów, implementacji narzędzi oraz ich testowania na przygotowanych zestawach danych. Wszystkie schematy rozwiązań zostały szczegółowo opisane i przedstawione w treści pracy.

Proponowane rozwiązania mogą zostać zaimplementowane w dowolnym wysokopoziomowym języku programowania. Odbiorca pracy może replikować przedstawione rozwiązania, korzystając z języków programowania takich jak Python czy C++, które spełniają paradygmat programowania obiektowego. W niniejszej pracy do implementacji algorytmów wykorzystano język Python.

Proces powstawania algorytmów odbywał się iteracyjnie (przyrostowo) poprzez prototypowe przygotowanie funkcji oraz metod, w celu wyboru optymalnych, na podstawie uzyskanych rezultatów cząstkowych.

W większości, dane testowe pochodziły z repozytoriów udostępniających dane na licencjach otwartych, co umożliwiało ich wykorzystanie do celów badawczych. Szczegółowy opis danych oraz ich charakterystyka zostały przedstawione w odpowiednich sekcjach, w których były używane.

Wytworzony w ramach pracy kod może być udostępniony na prośbę czytelnika. Z ograniczeniami co do komponentów wytworzonych w ramach projektu ERJU (Europe's Rail Joint Undertaking).

I.7 Struktura pracy

Struktura pracy przedstawia się następująco. W rozdziale drugim przedstawiono wprowadzenie do tematyki podjętej w ramach niniejszej pracy oraz omówiono problemy badawcze. W rozdziale trzecim przedstawiono specyfikę budowlanego procesu inwestycyjnego oraz dokonano charakterystyki domeny budowlanej i geoprzestrzennej w ujęciu stosowanych danych cyfrowych oraz zarządzania informacją. Przeanalizowano także proces transformacji cyfrowej w obu branżach m.in. poprzez opis metodyki BIM oraz wpływ

wdrożenia BIM w budowlanych procesach inwestycyjnych na domenę geoprzestrzenną. Dodatkowo, przeprowadzono analizę interoperacyjności między tymi domenami, a na podstawie badania literaturowego zidentyfikowano lukę badawczą. Ponadto, szczegółowo opisano stosowane metody integracji cyfrowych danych budowlanych i geoprzestrzennych. Rozdziały numer cztery i pięć stanowią część twórczą pracy, poszerzającą aktualny stan wiedzy (*ang. body of knowledge*). W rozdziale czwartym zidentyfikowano przykłady zastosowania integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych w budowlanym procesie inwestycyjnym. Na ich bazie opracowano uogólniony proces integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych wraz z identyfikacją oraz opisem poszczególnych działań, ze szczególnym uwzględnieniem opisów dwukierunkowej konwersji danych oraz łączenia danych. Następnie przeprowadzono analizy teoretyczne dotyczące aspektów georeferencji w BIM, a także reprezentacji geometrycznej i podejść do atrybutów i metadanych w obu domenach. Na bazie przeprowadzonych analiz opracowano algorytmy i zaimplementowano rozwiązania umożliwiające na przetwarzanie danych pomiędzy domenami. Całość zakończono przedstawieniem praktycznych realizacji działania opracowanych algorytmów. Natomiast rozdział piąty może być rozpatrywany jako kontinuum rozdziału czwartego. Przedstawiono w nim szczegółową analizę oraz implementację cyfrowych narzędzi wspierających dla zidentyfikowanych przykładów zastosowania odnoszących się do Geodezyjnej Obsługi Inwestycji. Bazą dla zaimplementowanych narzędzi były przede wszystkim opracowane i zaimplementowane algorytmy opisane w rozdziale czwartym. Ponadto w rozdziale piątym przeanalizowano aspekt wsparcia i optymalizacji budowlanego procesu inwestycyjnego na podstawie przedstawionych przypadków zastosowania. W rozdziale szóstym opisano wnioski z przeprowadzonych badań. W rozdziale siódmym dokonano podsumowania całości pracy oraz zaproponowano możliwe kierunki dalszych badań.

ROZDZIAŁ II. Problematyka

II.1 Wprowadzenie

Digitalizacja w branży budowlanej staje się nieodzownym elementem jej rozwoju. Tradycyjne metody zarządzania informacją w formie analogowej stają się przestarzałe w obliczu rosnącej ilości danych i informacji, które muszą być przetwarzane, analizowane i przechowywane. Implementacja nowoczesnych narzędzi cyfrowych do zarządzania informacją pozwala na zwiększenie efektywności procesów budowlanych poprzez lepsze zarządzanie zasobami czy komunikację pomiędzy interesariuszami, a co jest tego efektem skrócenie czasu realizacji projektów czy redukcja kosztów (Naji i in., 2024). Ponadto zwiększanie produktywności może odbywać się dzięki innowacyjnym rozwiązaniom, które umożliwiają poprawę działalności operacyjnej wewnętrznych interesariuszy budowlanych procesów inwestycyjnych. Przykładem takich rozwiązań może być wdrożenie BIM jako podstawowej formy realizacji inwestycji oraz fundament do zarządzania informacją w procesie budowlanym. W niniejszej pracy BIM będzie nierzadko wymiennie stosowany z terminem cyfrowe dane budowlane.

Wdrożenie metodyki BIM, mimo, że jest już realizowane od kilkunastu lat, wciąż generuje nowe możliwości rozpatrując kolejne innowacje możliwe do zaimplementowania. Przykładami takich innowacji są rozwiązania umożliwiające wsparcie czy optymalizacje budowlanych procesów inwestycyjnych poprzez integrację cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych.

Rozpatrując problematykę od strony domeny geoprzestrzennej, również obserwuje się istotne zmiany w metodach akwizycji danych, ich przetwarzania, przechowywania czy udostępniania oraz samej realizacji zadań w ramach budowlanego procesu inwestycyjnego. Wpływ cyfryzacji budowlanego procesu inwestycyjnego jest niezaprzeczalny, co powoduje potrzebę wytwarzania narzędzi wspierających procesy integracji w celu uzyskania określonych korzyści. W niniejszej pracy w odniesieniu do geoprzestrzennych danych pomiarowych, produktów uzyskanych na ich bazie, systemów GIS (Geographic Information System) czy danych geodezyjnych będzie wykorzystywany termin cyfrowych danych geoprzestrzennych.

Ponieważ w procesie budowlanym następuje wielokrotna interakcja pomiędzy domeną budowlaną oraz geoprzestrzenną, należy mieć na uwadze wzajemne oddziaływanie oraz potrzebę dostosowania czy budowy rozwiązań umożliwiających efektywne zarządzanie procesem, projektem, organizacją, informacją czy danymi. W literaturze, często pojawia się stwierdzenie integracji BIM i GIS, jednakże, według autora, jest to pewne zawężenie (bardziej szczegółowo aspekt ten zostanie rozwinięty w dalszej części). Dlatego w niniejszej pracy będzie wykorzystywane zarówno stwierdzenie integracji BIM i GIS, ale również szersze pojęcie integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych.

Przez integrację cyfrowych danych budowlanych i geoprzestrzennych rozumiane są wszystkie systemy, algorytmy, procesy czy koncepcje umożliwiające konwersję, łączenie oraz współpracę pomiędzy danymi i informacjami cyfrowymi pochodzącymi z domeny budowlanej oraz geoprzestrzennej. Celem tego działania jest wytworzenie spójnych i wszechstronnych

modeli informacji, które wspierają cały budowlany proces inwestycyjny od planowania po zarządzanie obiektem i rozbiórkę.

Integracja cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych stanowi znaczącą szansę jako element wspierający zarządzanie procesami w całym cyklu życia obiektu budowlanego. Jest to możliwe przede wszystkim ze względu na znacznie szerszy kontekst informacji, jaki dostarcza integracja danych z obu domen (Glinka, 2022). Cyfrowe dane budowlane skupione są najczęściej na samym obiekcie, który w fazie przygotowania, koncepcji czy też projektowania jest bytem wirtualnym, opisanym przez trójwymiarowy model 3D (geometria) oraz dane alfanumeryczne opisujące np. specyfikacje poszczególnych elementów czy procesy (np. harmonogram). W miarę upływu czasu obiekt wirtualny przekształcany jest w rzeczywisty posadowiony w wyznaczonym miejscu. Jednakże podczas realizacji poszczególnych etapów zachodzi konieczność podjęcia szeregu decyzji wynikających z czynników wewnętrznych (np. występujące kolizje międzybranżowe) czy też zewnętrznych (np. kwestie środowiskowe). Cyfrowe dane geoprzestrzenne mogą wspomóc zarówno analizę czynników wewnętrznych, jak i zewnętrznych. W ten sposób możliwe jest skuteczne wsparcie procesów decyzyjnych oraz działalności operacyjnej interesariuszy.

Również rozwiązania opisane w literaturze wskazują na możliwość usprawnienia prac budowlanych poprzez integrację cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych, w tym m.in. na obniżenie kosztów inwestycji (AlSaggaf & Jrade, 2023; Kurwi i in., 2021; Zhao i in., 2019) czy redukcję opóźnień (Su i in., 2012). Patrząc szerzej, interoperacyjność tych domen jest wykorzystywana nie tylko w branży AEC (Architecture, Engineering & Construction). Generalnie w badaniach dąży się do maksymalizacji wykorzystania potencjału integracji obu domen, w tym na przykład wykorzystanie dla celów: budowy katastru 3D (Gotlib & Karabin, 2017; J. Sun i in., 2019), automatyzacji procesów uzyskiwania pozwoleń na budowę (Noardo i in., 2022), oceny skutków katastrof naturalnych (Amirebrahimi i in., 2016) jak i prac związanych z tworzeniem trójwymiarowych reprezentacji mogących służyć wytwarzaniu Cyfrowych Bliźniaków miast (Shi i in., 2023) czy infrastruktury (Sofia i in., 2020).

Kolejnym aspektem jest wpływ zmian cyfryzacji procesu budowlanego na interesariuszy oraz ewolucja w metodach realizacji zadań w obszarze interakcji pomiędzy domeną budowlaną oraz geoprzestrzenną. Zidentyfikowane rozwiązania przedstawione powyżej oraz w sekcji III.3.2.4 skupiają się najczęściej na przykładach dotyczących zastosowania strictly integracji BIM i GIS, nie zaś szerszej integracji cyfrowych danych geoprzestrzennych oraz budowlanych. Ponadto proponowane aplikacje dotyczą często aspektów związanych z czynnościami administracyjnymi czy analizami środowiskowymi, a nie z bezpośrednim wsparciem procesów czy zadań w ramach budowlanego procesu inwestycyjnego. Jednym z przykładów zmian wynikających z transformacji cyfrowej jest ewolucja w pracy inżyniera geodety, który w ramach Geodezyjnej Obsługi Inwestycji w BIM realizuje podobne zadania jak dotychczas, jednak w całkowicie nowym wydaniu, w szczególności w obszarze podejścia do danych i informacji. Na podstawie badań literaturowych nie zidentyfikowano pozycji rozpatrujących ten obszar.

Ponadto wciąż istnieje deficyt algorytmów, narzędzi, instrukcji, standardów czy wytycznych umożliwiających w pełni zintegrowanie domeny budowlanej oraz

geoprzestrzennej, zwłaszcza z perspektywy budowy strategii zarządzania informacją. Niewątpliwie jest jednak, że pozytywnie współgrają one ze sobą, a efektywna wymiana informacji może generować efekt synergii. Również w ramach zdiagnozowanej luki badawczej widoczne są braki w algorytmach, cyfrowych narzędziach wspierających oraz rozwiązaniach, umożliwiających wsparcie procesów integracji cyfrowych danych geoprzestrzennych oraz budowlanych w budowlanym procesie inwestycyjnym. W szczególności, w przypadku stosowania standardów otwartych, problematyka ta wydaje się nie w pełni zrealizowana w dotychczasowych badaniach. Dlatego też w toku prac opracowano w formie modułów rozwiązania pozwalające na integrację cyfrowych danych przestrzennych oraz budowlanych, a następnie na ich podstawie, na realizację wybranych przypadków zastosowania w formie cyfrowych narzędzi wspierających.

Rozpatrując zrealizowane do tej pory rozprawy doktorskie w Polsce o analogicznej tematyce do tej podjętej w ramach niniejszej pracy, należy omówić powstałą na Politechnice Warszawskiej pracę przedstawiającą koncepcję zintegrowanej bazy danych przestrzennych dla systemów BIM i GIS (Wyszomirski, 2019). Przedstawiona koncepcja bazuje przede wszystkim na formatach danych IFC (Industry Foundation Classes) w wersji 2x3 oraz CityGML (City Geography Markup Language). Dla celów ich obsługi, dane są przetransformowywane do zintegrowanej bazy danych z wykorzystaniem systemów ETL (Extract Transform Load). Zaimplementowane metody i funkcje w ramach bazy danych SQL (Structured Query Language) dają następnie możliwość eksportu danych do systemów BIM bądź GIS. Porównując zakres obu prac, niniejszej oraz powyżej opisanej, autor w niniejszej pracy skupia się na opracowaniu rozwiązań o innym zastosowaniu. Rozpatrywane są przede wszystkim aspekty wsparcia działań w ramach budowlanego procesu inwestycyjnego, w szczególności w ramach GOI. Ponadto analizowane są również reprezentacje bazodanowe, jednak z mniejszym naciskiem na budowę rozległych struktur oraz procedur, a bardziej na wykorzystanie baz danych do zdefiniowanych przykładów zastosowania w ramach budowlanego procesu inwestycyjnego. Co więcej, w niniejszej pracy analizowane są nowsze wersje formatu IFC, pozwalające m.in. na zamodelowanie informacji o georeferencji czy infrastrukturze.

II.2 Opis problemów badawczych

Z uwagi na różnice w charakterystyce cyfrowych danych budowlanych oraz cyfrowych danych geoprzestrzennych istnieją trudności w ich integracji oraz realizacji inwestycji w sposób spójny w obszarze zarządzania tymi danymi. Podstawowym problemem jest różnica w podejściu nawet do fundamentalnych założeń. Przykładem jest traktowanie georeferencji, która w przypadku danych geoprzestrzennych jest nadawana z definicji, natomiast w przypadku cyfrowych danych budowlanych nie zawsze jest stosowana. Kolejnym problemem są różnice w standardach dotyczących m.in. reprezentacji geometrycznej obiektów. W przypadku cyfrowych danych budowlanych (format IFC) jest to reprezentacja zagnieżdżona (np. parametryczny opis). Z drugiej strony, w przypadku opisu geometrii dla danych geoprzestrzennych, stosowana jest reprezentacja jawna (każdy punkt reprezentacji posiada współrzędne w określonym np. przez kod EPSG (European Petroleum Survey Group) układzie współrzędnych). Ponadto formaty danych w obu domenach charakteryzują się różnymi parametrami pojemności informacyjnej, co utrudnia możliwość

literalnego podejścia do konwersji. Tak więc pierwszym z podjętych problemów podczas realizacji badań jest opracowanie schematów oraz algorytmów, a na ich podstawie implementacja rozwiązań w formie modułów w celu uniwersalnego podejścia do integracji cyfrowych danych budowlanych oraz cyfrowych danych geoprzestrzennych zarówno dla obiektów kubaturowych jak i infrastrukturalnych.

Drugi z przeanalizowanych obszarów dotyczy identyfikacji oraz opisu przykładów zastosowania integracji, w tym łączenia czy konwersji cyfrowych danych geoprzestrzennych oraz budowlanych, które mogą wspomóc poszczególne etapy w całym cyklu życia obiektu.

Trzeci z podjętych problemów dotyczy wpływu transformacji cyfrowej na prace inżynierów realizujących zadania związane z budowlanym procesem inwestycyjnym, w szczególności inżynierów geodetów. W związku z powyższym, w toku prac przeanalizowano zmiany w procesach budowlanych spowodowane digitalizacją oraz zaproponowano i zaimplementowano cyfrowe narzędzia wspierające działania związane m.in. z prowadzonymi pracami od strony geodezyjnej w szczególności w zakresie Geodezyjnej Obsługi Inwestycji (GOI).

ROZDZIAŁ III. Cyfrowe dane budowlane i geoprzestrzenne

W niniejszym rozdziale zostaną przedstawione, scharakteryzowane oraz poddane analizie aspekty związane z budowlanym procesem inwestycyjnym oraz implikacje wynikające z digitalizacji tego procesu. W obszarze cyfrowych danych budowlanych zostanie przedstawiona podstawowa terminologia, metodyka BIM oraz standardy służące do jej realizacji. Z drugiej strony, w obszarze cyfrowych danych geoprzestrzennych, zostaną opisane podstawy oraz zaprezentowane zostaną poszczególne zasoby, na które składają się: GIS, dane pomiarowe, produkty uzyskiwane z tych danych oraz dane geodezyjne. Jako końcowy element analizy zostaną przedstawione problemy w interoperacyjności pomiędzy domeną budowlaną oraz geoprzestrzenną, metody integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych, obszary zastosowania integracji wraz z identyfikacją głównych problemów oraz braków w istniejących rozwiązaniach. Całość zakończono i podsumowano analizą SWOT integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych.

III.1 Budowlany proces inwestycyjny oraz BIM

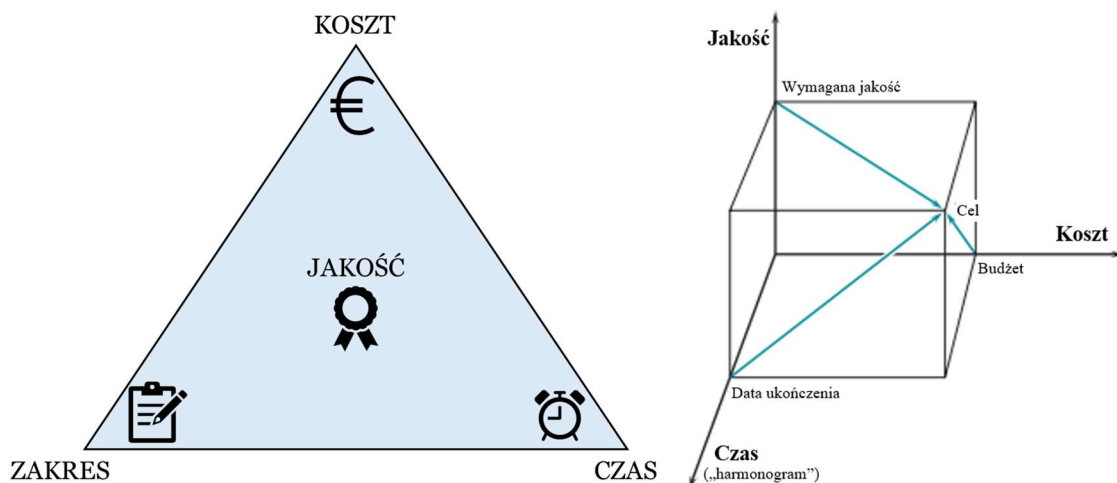
III.1.1 Potrzeba zmian

Sektor budowlany stoi przed poważnymi wyzwaniami, które determinują potrzebę fundamentalnych zmian w różnych obszarach (McKinsey Global Institute, 2017). Konieczność transformacji wynika z szeregu czynników, które po części możliwe są do wyeliminowania poprzez zmiany technologiczne w procesie projektowania oraz realizacji prac, inkorporację nowoczesnych technologii i pracę nad innowacjami, optymalizację prac budowlanych, nowelizację obowiązujących aktów prawnych, zmianę podejścia do zawieranych umów i kontraktów, zwiększanie niezawodności łańcuchów dostaw oraz przeszkalanie i doszkalanie pracowników (McKinsey Global Institute, 2017). Jednakże zmiany te muszą przebiegać w sposób ewolucyjny oraz współbieżnie.

W (Durdyev i Hosseini, 2020) zidentyfikowano kilka głównych zagadnień związanych z sektorem budowlanym, które generują problemy i zaburzają triadę projektową (Rys. 1), przede wszystkim powodując opóźnienia w projektach, a są to:

- Sprzęt oraz technologie projektowania i wznoszenia obiektów – przestarzałe oraz nieefektywne,
- Zarządzanie placem budowy – braki w implementacji rozwiązań pozwalających na optymalizację prac,
- Komunikacja - problemy w komunikacji między interesariuszami oraz trudności w koordynacji na różnych etapach procesu inwestycyjnego,
- Logistyka oraz zapotrzebowanie na materiały – brak dostępności materiałów budowlanych lub trudności w łańcuchach dostaw,
- Kompetencje i kadry – brak odpowiedniego doświadczenia oraz umiejętności kadr wykonujących zadania związane z budowlanym procesem inwestycyjnym, braki w kadrach,
- Planowanie – nadmierne lub niewystarczające planowanie,

- Czynniki klimatyczne oraz ekstremalne warunki pogodowe,
- Finanse – problemy finansowe przedsiębiorstw (kontrahentów) czy opóźnienia w płatnościach wpływające na harmonogram prac.



Rysunek 1 Triada projektowa jako podstawowa zależność w zarządzaniu projektami oraz procesach inwestycyjnych (Project Management Institute, 2017)

Patrząc jeszcze szerzej, na cały budowlany proces inwestycyjny, należy również przeanalizować różnego rodzaju budżety. Po pierwsze rachunek ekonomiczny TOTEX (TOTAL EXpenditure), a właściwie suma CAPEX (CAPital EXpenditures), czyli kosztów wytworzenia oraz OPEX (OPERating EXpenditures) – kosztów operacyjnych - powinny być brane pod uwagę podczas realizacji inwestycji (w szczególności w początkowych fazach) (Pittard & Sell, 2017).

Poza rachunkiem stricte ekonomicznym, możliwe są również inne np. kalkulacje wpływu na środowisko. Trendy związane z zrównoważonym rozwojem (oraz powiązane z tym zagadnieniem kwestie zmian klimatycznych) są polem do przeobrażania się sektora budowlanego np. wprowadzenie idei gospodarki o obiegu zamkniętym dla procesów budowlanych (Benachio i in., 2020). Tradycyjne metody budowlane są intensywne pod względem zużycia zasobów i w znacznym stopniu przyczyniają się do degradacji środowiska (Sev, 2009).

Problematyka potrzeby zmian jest tym bardziej istotna, ponieważ według innego raportu McKinsey (McKinsey&Company, 2020), udział sektora budowlanego w globalnym PKB (Produkt Krajowy Brutto) ma wzrosnąć z około 12% w 2020 roku do ponad 19% w 2035 roku. Jest to wynikiem rosnącej liczby ludności, a co jest tego efektem, zwiększającego się zapotrzebowania na infrastrukturę oraz inne obiekty budowlane (McKinsey&Company, 2020; Milnes i in., 2014).

III.1.2 Charakterystyka domeny budowlanej w ujęciu cyfrowych danych budowlanych

III.1.2.1 Aspekty zarządcze budowlanego procesu inwestycyjnego

Przed przejściem do szczegółowego opisu procesu inwestycyjnego w budownictwie wprowadzona zostanie podstawowa terminologia związana z aspektami zarządczymi oraz stosowanymi metodami zarządzania procesami oraz projektami.

Z punktu widzenia zarządczego pierwszym ważnym terminem jest interesariusz. Jest to słowo, którym definiuje się każdą osobę lub grupę mającą wpływ na realizację projektu czy też inwestycji. W procesie inwestycyjnym możliwe jest wyróżnienie interesariuszy wewnętrznych oraz zewnętrznych. Interesariusze wewnętrzni to osoby i organizacje bezpośrednio zaangażowane w sterowanie, koncepcję, projekt czy jego realizację. Natomiast interesariusze zewnętrzni to osoby bądź organizacje, które wpływają na prace i rezultaty, jednak nie są podmiotami odpowiedzialnymi za modelowanie informacji czy podejmowanie decyzji (Trocki i in., 2012). Przykładem mogą być instytucje regulujące np. akty prawne. W ramach projektu czy też budowlanego procesu inwestycyjnego struktura interesariuszy najczęściej ulega zmianie, co jest często powiązane z metodą prowadzenia inwestycji.

Podczas realizacji budowlanego procesu inwestycyjnego, poszczególni interesariusze realizują różnego rodzaju podprocesy, które znowu składają się z kolejnych podprocesów i tak dalej. W ten sposób określana jest struktura podziału pracy WBS (*ang. Work Breakdown Structure*). Sam proces jest definiowany jako zbiór powiązanych działań, które mają doprowadzić do osiągnięcia celu. Ponieważ jest najczęściej powtarzalny istnieją metody jego mapowania, monitorowania (np. poprzez metryki) oraz sterowania. Stąd w literaturze pojawiają propozycje wytwarzania dobrych praktyk zarządzania procesami w budownictwie opartych o szczupłe zarządzanie procesami (Lean) opisane m.in. w (Tzortzopoulos i in., 2020). Dobre praktyki mają na celu odpowiednie zwiększenie efektywności procesów, poprzez ich przyspieszenie i poprawę jakości, przy jednoczesnym zmniejszeniu marnotrawienia zasobów. Wymaga to jednak odpowiedniego poznania procesów oraz mapowania.

Stopień skomplikowania procesów oraz ich charakterystyka determinuje stosowane rozwiązania zarządcze. Rozpatrując projekt jako zbiór działań, a w niektórych przypadkach zbiór procesów, możliwe są do zastosowania różne metodyki zarządzania projektami, które są często zależne od specyfiki branży, ale również dojrzałości organizacyjnej interesariuszy. Można wyróżnić dwa podstawowe rodzaje zarządzania projektami: kaskadowe oraz zwinne. Kaskadowe metodyki zarządzania projektami, inaczej zwane klasycznymi bądź tradycyjnymi, opierają się o liniowe podejście z minimalnym pokryciem poszczególnych faz. Kolejne etapy projektu następują krok po kroku (kończone są najczęściej kamieniem milowym), z ograniczonymi możliwościami iteracji oraz wstecznej interakcji. Dwie podstawowe metodyki to PRINCE2 (duży nacisk na uzasadnienie biznesowe – zasadność prowadzenia projektu) oraz PMBoK (opis najlepszych praktyk zarządczych).

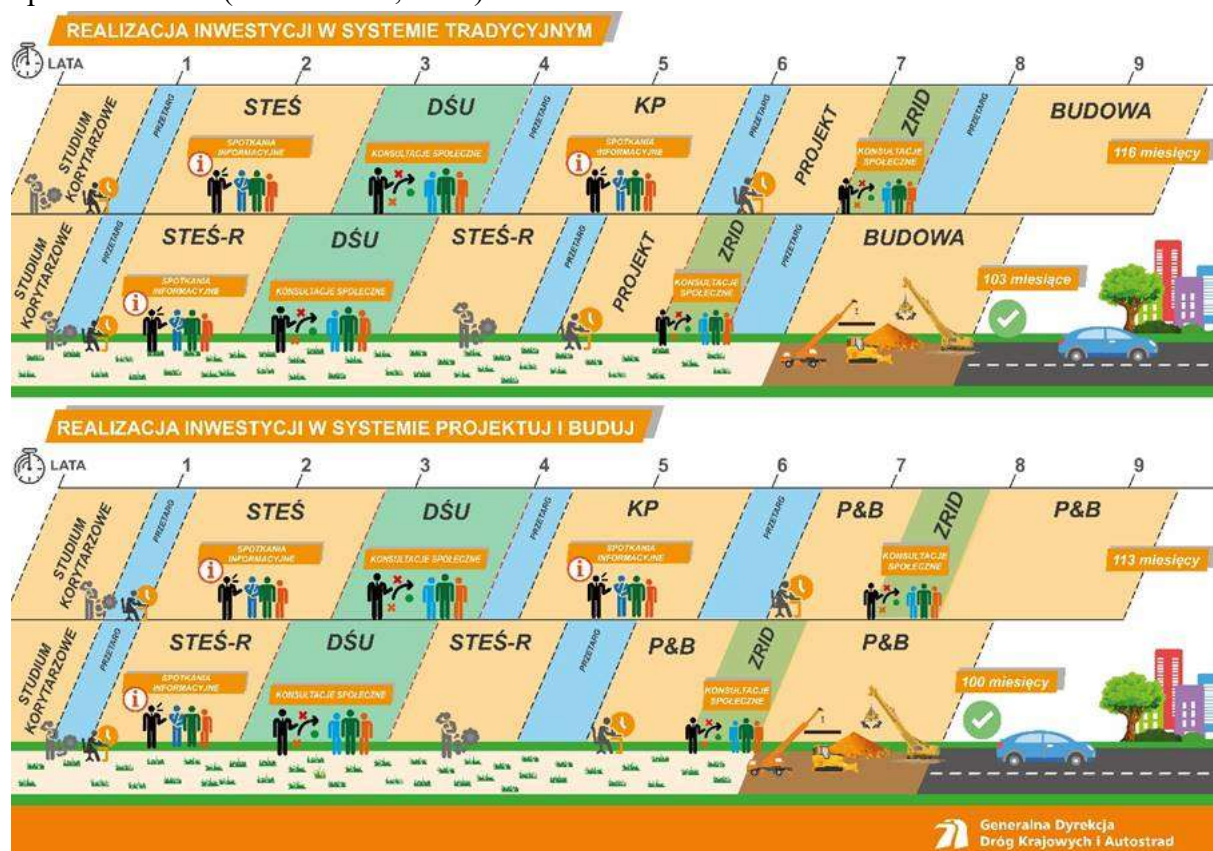
Zwinne metodyki zarządzania projektami, wymagają zdecydowanie większej dojrzałości oraz elastyczności w organizacji. Głównym ich założeniem jest możliwość dostosowania do zmian w celu wytworzenia jak najlepszego produktu, spełniającego wymagania końcowych użytkowników czy zamawiającego. Przykładem metodyki zwinnej jest Scrum, którego zasady są jasno sformułowane na zaledwie kilku stronach (Schwaber & Sutherland, 2020).

Tworzone są również różnego rodzaju hybrydy, które mają na celu dodanie aspektu zwinności w metodykach klasycznych, bądź w przeciwnym kierunku, dodania najlepszych praktyk oraz idei z klasycznych metodyk do tych zwinnych.

Wybór metodyki zarządzania projektami może być różny w obrębie poszczególnych zespołów wykonawczych, jednakże po części jest determinowany przez podejście do prowadzenia inwestycji. Wśród podstawowych metod realizacji przedsięwzięcia budowlanego można wyróżnić:

- DBB (*Design-Bid-Build*) - Zaprojektuj, wybierz wykonawcę, wybuduj
- DB (*Design-Build*) - Projektuj i buduj
- CM (*Construction Management*) - Zarządzanie budową
- IPD (*Integrated Project Delivery*) – Zintegrowany Proces Inwestycyjny

Zastosowane podejście implikuje bezpośrednio fazy czy etapy realizacji prac, zmianę układu interesariuszy podczas trwania projektu czy wpływa nawet na czas realizacji inwestycji (Rys. 2). Szczegółowo charakterystyka metod realizacji przedsięwzięcia budowlanego została opisana m.in. w (Kaszniak i in., 2017).



Rysunek 2 GDDKiA - realizacja inwestycji w zależności od metody prowadzenia inwestycji (GDDKiA. Inwestycja drogowa to projekt na lata)

III.1.2.2 Budowlany proces inwestycyjny

Budowlany proces inwestycyjny jest najczęściej długim oraz zmiennym procesem, stąd jego analizę należałoby rozpatrywać przez pryzmat całego cyklu życia obiektu, wyodrębniając poszczególne fazy. Poniżej zaprezentowano w sposób schematyczny cykl życia obiektu (Rys. 3), do którego autor będzie się odnosił w dalszych częściach pracy. Istnieją również terminy takiej jak LCA (Life Cycle Assessment) mające na celu ocenę wpływu obiektu na środowisko w całym cyklu życia obiektu.

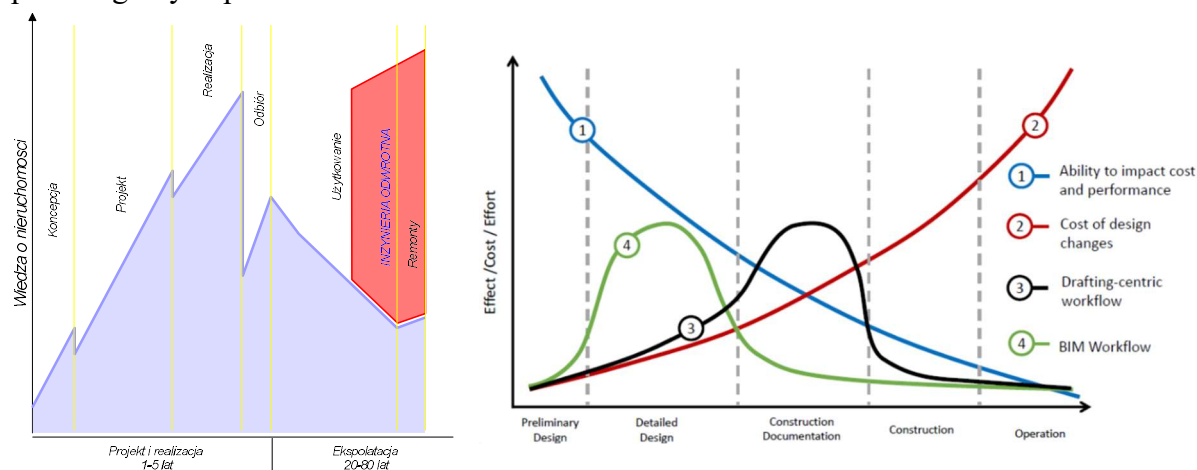


Rysunek 3 Etapy cyklu życia obiektu

Budowlany proces inwestycyjny to zbiór procesów, decyzji, informacji czy też działań, które mają doprowadzić do celu, którym jest zaprojektowanie, a następnie stworzenie rzeczywistego obiektu oraz zarządzanie nim. Informacja, która jest wytwarzana na poszczególnych etapach ma różną istotność oraz jakość, jednakże ogólnie powinna spełniać warunki takie jak dostępność, aktualność, rzetelność, wartość, szczegółowość, czy jednoznaczność (*Cechy informacji – Encyklopedia Zarządzania*). W budowlanym procesie inwestycyjnym, gdy informacja jest wytwarzana przez wielu interesariuszy, problematyka ta jest w szczególności istotna, ponieważ ma wpływ na efektywność realizacji kolejnych etapów w ramach cyklu życia obiektu. Poniżej przedstawiono dwa wykresy bardziej szczegółowo ilustrujące powyższe zagadnienie (Rys. 4). Po pierwsze, wraz z kolejnymi etapami projektu, wiedza na temat obiektu czy też nieruchomości rośnie, jednakże w momentach przejścia do kolejnych faz mamy do czynienia z jej skokowym spadkiem, co jest spowodowane np. zmianami w strukturze interesariuszy i braku wytycznych oraz wymagań co do przekazania wiedzy o nieruchomości. Ponadto widoczny jest jej spadek w momencie odbioru, kiedy to za obiekt odpowiada już użytkownik czy zamawiający, co znowu może być spowodowane powyższymi czynnikami oraz m.in. brakami kompetencyjnymi co do zarządzania informacją. Na kolejnych etapach widoczny jest liniowy spadek wiedzy o obiekcie mogący wynikać z braku przeglądów oraz odpowiedniej aktualizacji informacji dla wiedzy z etapu odbioru. W momencie osiągnięcia pewnej wartości braku wiedzy wymagane jest więc przeprowadzenie działań inżynierii odwrotnej w celu odtworzenia informacji, jednakże jest to proces często czasochłonny oraz kapitałochłonny. Obecnie podejmowane są próby eliminacji tego aspektu poprzez zastosowanie np. Cyfrowych Bliźniaków.

Drugi z poniższych wykresów (Rys. 4) to tzw. krzywa MacLeamy’ego zestawiająca ze sobą koszt zmian w projekcie, zdolność kontrolowania kosztów oraz zaangażowanie. Podstawowa idea, która stoi za tym zagadnieniem to przesunięcie zaangażowania, a co za tym idzie decyzji, na wcześniejsze etapy i dostarczenie jak najlepszej jakości informacji oraz wymagań, w celu obniżenia kosztów realizacji i usunięcia np. konfliktów międzybranżowych na wczesnych

etapach inwestycji czy też zastosowania określonych przypadków użycia w celu wsparcia poszczególnych procesów.

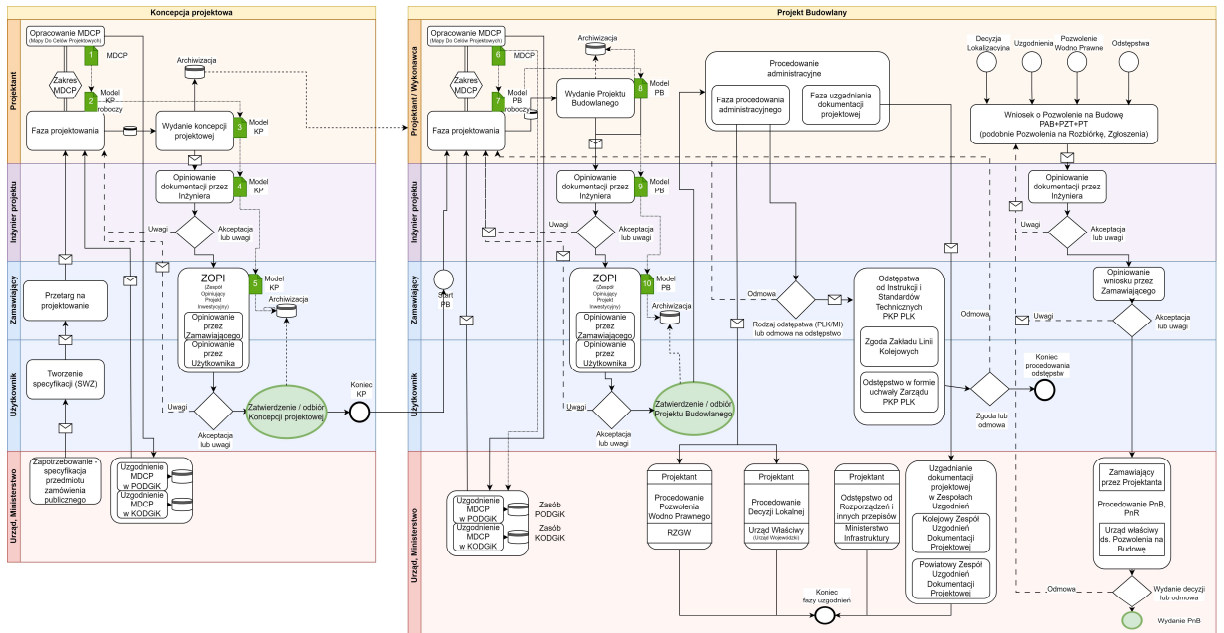


Rysunek 4 Zmiana na temat wiedzy o obiekcie/nieruchomości w czasie (po lewej) (Kaszniak i in., 2017) oraz krzywa MacLeamy'ego zestawiająca ze sobą koszt zmian w projekcie, zdolność kontrolowania kosztów oraz zaangażowanie (po prawej) (Halim i in., 2022)

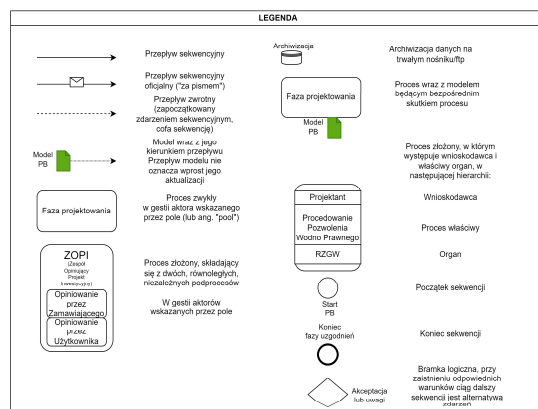
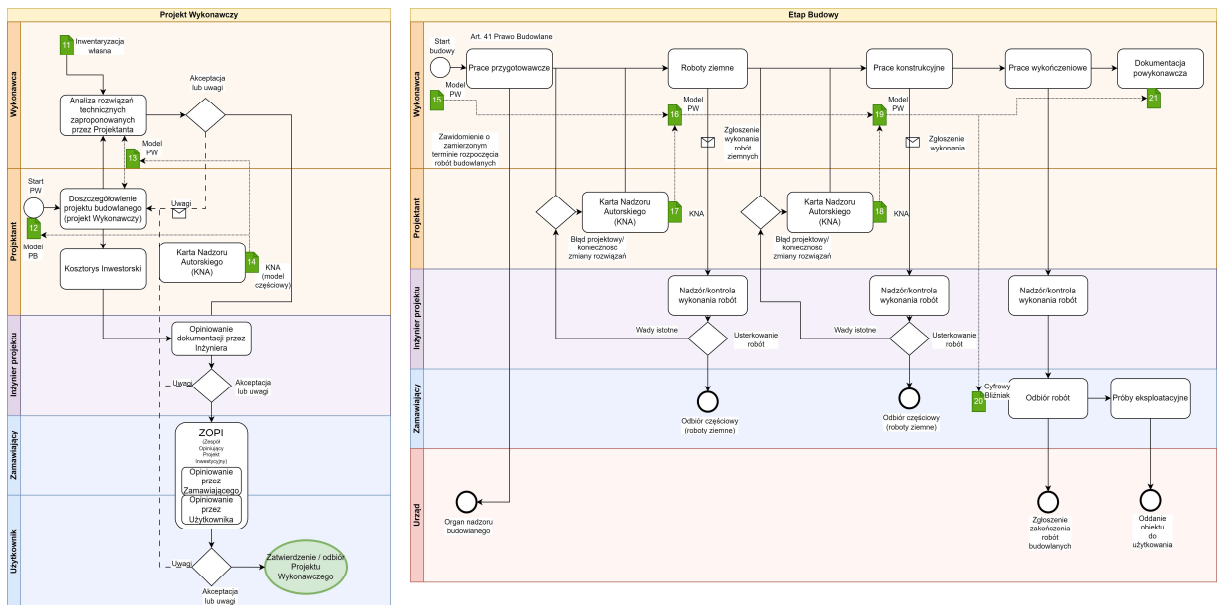
Można więc podsumować, że zarządzanie informacją jest kluczowe ze względu na zapewnienie odpowiedniej jakości poszczególnych etapów cyklu życia obiektu oraz realizowanych procesów.

Każdy z etapów cyklu życia jest charakteryzowany przez różne cechy, a także różne procesy powinny zachodzić podczas każdego z tych etapów. Poniżej zostały przedstawione przykładowe mapy procesów opracowane w ramach projektu FP4 Europe's Rail Joint Undertaking dla spółki PKP SA dla celów realizacji dworca kolejowego (Rys. 5; Rys. 6) dla etapów: koncepcji, projektowania (projektu budowlanego i projektu wykonawczego) oraz wznoszenia. Na ich podstawie możliwe jest zidentyfikowanie poszczególnych przepływów informacji pomiędzy interesariuszami w celu określenia wymagań informacyjnych oraz określenie tzw. wąskich gardeł, czyli miejsc, w których występują ograniczenia w przepływie informacji lub zasobów, co może negatywnie wpływać na efektywność procesu inwestycyjnego.

W przypadku spółek prywatnych, nie działających na podstawie Prawa Zamówień Publicznych (PZP), procesy te będą wyglądać nieco inaczej, jednakże decyzje do podjęcia w każdym z etapów będą zbliżone.



Rysunek 5 Przykładowe mapy procesu etapu koncepcji oraz projektowania (projekt budowlany) (T. Owerko i in., 2024)



Rysunek 6 Przykładowe mapy procesu projektowania (projekt wykonawczy) oraz etapu budowy (T. Owerko i in., 2024)

Poniżej w sposób tabelaryczny (Tab. 1) przedstawiono każdy ze zidentyfikowanych etapów cyklu życia obiektu wraz z syntetyczną charakterystyką. Szczegółowa charakterystyka cykli życia obiektu została opisana między innymi w dokumencie *RIBA Plan of Work 2020* (Royal Institute of British Architects, 2020).

Tabela 1 Charakterystyka etapów cyklu życia obiektu

<i>Etap cyklu życia</i>	<i>Krótką charakterystyką (główne zadania)</i>
<i>Przygotowanie (Strategia)</i>	Przygotowanie pod inwestycję, stworzenie wstępnych wymagań informacyjnych oraz strategii zarządzania inwestycją, opracowanie wstępnej analizy ryzyka oraz uzasadnienia biznesowego, określenie budżetu projektu, założeń oraz celów (np. jakościowych), analiza miejsca budowy np. potrzebnych gruntów do pozyskania.
<i>Koncepcja</i>	Przygotowanie koncepcji i np. wariantów inwestycji, wybór docelowego wariantu na podstawie analiz w tym np. konsultacje z interesariuszami czy opiniowania (np. konsultacje społeczne czy środowiskowe). Opracowanie szczegółowych planów strategicznych np. związanych z kosztami, specyfikacją czy rozwiązaniami zarządczymi. Przygotowanie do przetargu oraz zdefiniowanie założeń oraz wymagań co najmniej do etapu projektowania.
<i>Projektowanie</i>	Stworzenie cyfrowej reprezentacji obiektu poprzez iteracyjny przyrost informacyjny, koordynacja międzybranżowa, opracowanie pełnej dokumentacji projektowej i technicznej (budowlanej i wykonawczej). Uzgodnienie projektu z interesariuszami, uzyskanie wymaganych pozwoleń (np. pozwolenie na budowę), przygotowanie planów związanych z realizacją, budżetem i harmonogramem. Aktualizacja założeń projektowych.
<i>Wznoszenie (budowa)</i>	Realizacja prac budowlanych zgodnie z przygotowanymi planami i projektem (np. projektem wykonawczym). Monitorowanie postępów budowy, kontrola kosztów, czasu oraz jakości wykonania. Nadzór nad realizowanymi pracami. Przeprowadzanie odbiorów częściowych (np. roboty zanikające) oraz końcowych. Zarządzanie zasobami, w tym materiałami, sprzętem i zasobami ludzkimi. Zakończenie w postaci odbioru obiektu i wytworzenia dokumentacji powykonawczej w celu uzyskania zgody na eksploatację.
<i>Konserwacja i utrzymanie</i>	Działania konserwacyjne i serwisowe w celu utrzymania obiektu w odpowiednim stanie technicznym. Monitorowanie zużycia materiałów oraz komponentów, reagowanie na awarie oraz planowanie działań naprawczych.
<i>Modernizacja</i>	Przeprowadzenie modernizacji i ulepszeń, np. dostosowanie obiektu do nowych norm, standardów lub technologii. Planowanie działań związanych z rewitalizacją, rozbudową lub zmianą funkcji obiektu, zgodnie z nowymi wymaganiami użytkowników czy zarządzającego.

<i>Rozbiórka</i>	Realizacja prac związanych z demontażem lub rozbiórką obiektu. Zapewnienie bezpieczeństwa podczas procesu rozbiórki, odzysk materiałów, recykling oraz odpowiednia utylizacja odpadów. Przeprowadzenie działań końcowych, przywrócenie terenu do stanu pierwotnego lub nowej funkcji.
------------------	---

Z punktu widzenia nowoczesnych rozwiązań zarządczych tworzone są ramowe opisy prac (*ang. framework*), które mają za zadanie wprowadzić metody zarządcze dostosowane wprost do branży budowlanej.

Przykładem może być metodyka zredagowana przez CIOB (Chartered Institute of Building) wywodzący się z rynku brytyjskiego. Jest to opis dobrych praktyk oraz narzędzi, na bazie metodyki zarządzania projektami PRINCE2 opisany w ramach podręcznika *Code of Practice for Project Management for the Built Environment* (CIOB, 2022), odnoszący się w najnowszych wersjach również do BIM.

VDC (Virtual Design Construction) definiowany przez twórcę jako zastosowanie interdyscyplinarnych modeli projektowo-budowlanych, obejmujących obszary takie jak produkt (obiekt), procesy oraz organizacja zespołów projektowych, budowlanych oraz operacyjnych w celów wspierania celów biznesowych (Fischer & Kunz, 2004). Jego ideą jest skupienie na uczestnikach procesu inwestycyjnego oraz współpraca na różnych polach np. poprzez zarządzanie oparte na produkcie (PPM), spotkania ICE (Integrated Concurrent Engineering), czyli sesje mające na celu szybsze i bardziej skuteczne podejmowanie decyzji, zastosowanie nowoczesnych narzędzi takich jak BIM oraz pomiary wydajności i bieżące monitorowanie procesów. Szczegółowo VDC jest opisane w (Fischer i in., 2017; Kunz & Fischer, 2020). Podejście to jest zapewne innowacyjne, jednakże wymaga odpowiedniej dojrzałości oraz adekwatnego przygotowania czy zmian w tym m.in. oparcia inwestycji o IPD (Integrated Product Delivery) czy zmian w stosowanych kontraktach (Khanna i in., 2021).

Lean Construction to ogólnie idea zastosowania narzędzi ze szczupłych metodyk zarządzania mająca na celu usprawnienie procesów w branży budowlanej. Szczegółowo aspekt ten jest opisany m.in. w (Tzortzopoulos i in., 2020).

III.1.2.3 Cyfryzacja budowlanego procesu inwestycyjnego oraz stosowane standardy

Cyfryzacja procesów budowlanych nie jest ideą nową, ramy prac (*ang. framework*) oraz różnego rodzaju rozwiązania typu dowód koncepcji (*ang. proof-of-concept*) są realizowane właściwie już od momentu upowszechnienia komputerów. Jednakże BIM jako metodyka czy też zestaw narzędzi (technologia) jest pierwszym globalnie stosowanym rozwiązaniem, który umożliwia zarządzanie informacją w procesach budowlanych, integrując etapy cyklu życia obiektu w oparciu o standardy otwarte.

W celu wypracowania globalnych rozwiązań oraz możliwości ujednolicenia procesów wymiany informacji zostały opracowane różnego rodzaju standardy, na bazie których zostanie przedstawiona metodyka BIM oraz realizacja samej cyfryzacji. Poniżej wylistowano najważniejsze standardy, na które składa się metodyka BIM, do których autor następnie będzie się odwoływał.

BIM – dostarczanie i zarządzanie informacją oraz fundamentalne założenia:

- ISO 19650-1 – *Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modeling Part 1: Concepts and principles*
- ISO 19650-2 – jw. *Part 2: Delivery phase of assets*
- Ponadto: ISO 19650-3 – jw. *Part 3: Operational Phase of assets*; ISO 19650-4 – jw. *Part 4: Information exchange*; ISO 19650-5 – jw. *Part 5: Security-minded approach to information management*; ISO 19650-6 – jw. *Part 6: Health and Safety*

Poziomy szczegółowości informacyjnej:

- ISO 7817-1:2024 - *Building information modelling — Level of information need — Part 1: Concepts and principles (na bazie EN 17412-1:2020)*

Otwarty format wymiany danych:

- ISO 16739 - *Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries — Part 1: Data schema*

Definicja terminologii oraz klasyfikacji dla modelowanych obiektów (IFD - International Framework for Dictionaries; bSDD - buildingSMART Data Dictionary):

- ISO 12006-2 - *Building construction — Organization of information about construction works — Part 2: Framework for classification*
- ISO 12006-3 - *Building construction — Organization of information about construction works — Part 3: Framework for object-oriented information*

Podręczniki dostarczania informacji:

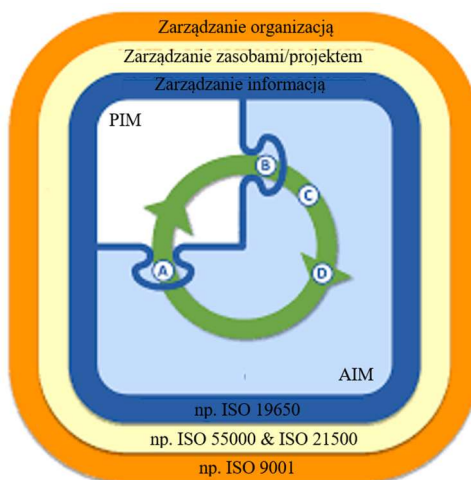
- ISO 29481-1 - *Building information models — Information delivery manual — Part 1: Methodology and format*
- ISO 29481-2 - *Building information models — Information delivery manual — Part 2: Interaction framework*
- ISO 29481-3 - *Building information models — Information delivery manual — Part 3: Data schema*

Budowlany proces inwestycyjny można podzielić na dwie podstawowe części, biorąc pod uwagę wypracowywany model informacyjny. Pierwsza część dotyczy fazy przygotowania, koncepcji oraz projektowania, w której obiekt powstaje w wersji cyfrowej (wirtualnej). Natomiast druga część odnosi się do realizowanego lub zrealizowanego obiektu, który występuje w formie rzeczywistej lub jednocześnie rzeczywistej i wirtualnej, w przypadku zastosowania idei Cyfrowego Bliźniaka. Aby wypracować jak najlepsze modele informacyjne potrzebne jest odpowiednie podejście do zarządzania informacją.

W celu ujednoczenia procesów związanych z zarządzaniem informacją stosowane są w ramach BIM standardy ISO 19650, w szczególności część pierwsza (ISO 19650-1:2018 - *Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and principles*, 2018) i druga (ISO 19650-2:2018 - *Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 2: Delivery phase of the*, 2018). Zostaną one teraz szczegółowo przeanalizowane w celu przedstawienia fundamentalnych założeń tej metodyki. W kolejnych

sekcjach natomiast, zostaną przedstawione technologie realizujące paradygmaty opisane w ramach założeń oraz pozostałych wymienionych powyżej standardów.

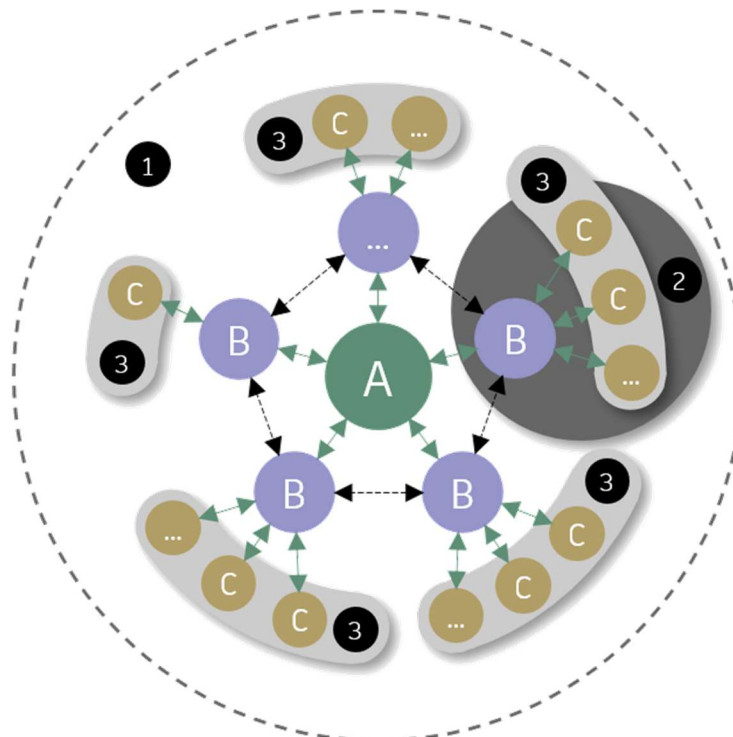
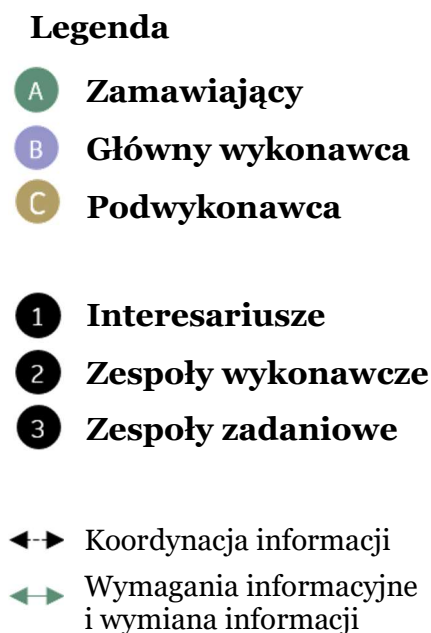
Standard (ISO 19650-1:2018 - Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and principles, 2018) definiuje podstawowe założenia oraz koncepcje dotyczące zarządzania informacją w kontekście BIM. Zasadniczo, zarządzanie informacją ma na celu wspomaganie procesów decyzyjnych. W kontekście podejmowania decyzji w ramach struktur organizacyjnych, podstawą są standardy dotyczące: zarządzania organizacją, zarządzania zasobami, a także zarządzania projektami, przy czym na najniższym poziomie znajduje się zarządzanie informacją. Elementy te powinny harmonijnie współgrać ze sobą. Poniżej, na rysunku (Rys. 7), przedstawiono zaproponowaną w ramach standardów ISO strukturę.



Rysunek 7 Ogólna struktura zarządcza wynikająca ze standardów dla celów zarządzania informacją projektową oraz o zasobach (ISO 19650-1:2018 - Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and principles, 2018)

W cyklu decyzyjnym najważniejszym elementem jest informacja, która jest dostarczana przez interesariuszy. Rozpatrując podstawową strukturę interesariuszy wewnętrznych, którzy biorą udział w procesach BIM w ramach standardu ISO należy wyróżnić: zamawiającego, głównego wykonawcę, bądź głównych wykonawców oraz podwykonawców (Rys. 8). Razem poszczególne grupy tworzą zespoły zadaniowe oraz wykonawcze. Ponadto cała struktura jest otoczona również przez interesariuszy zewnętrznych, którzy swoimi czynnościami mogą wpływać na projekt. Pomiędzy poszczególnymi interesariuszami zachodzą interakcje wynikające z kontraktów i wymagań. Działania te mają na celu budowanie wartości organizacji oraz wytworzenie końcowego produktu o jak najlepszej jakości, którym może być np. projekt wykonawczy z podziałem na branże w postaci sfederowanej lub zrealizowanie obiektu w formie rzeczowej.

Analizując role już w poszczególnych zespołach wykonawczych możliwa jest identyfikacja takich ról jak BIM Manager, BIM Koordynator czy BIM Modeler i wiele innych. Szczegółowo role te zostały opisane m.in. w BIM Standard PL (Piwkowski i in., 2020).



Rysunek 8 Struktura interesariuszy w ramach standardów ISO 19650

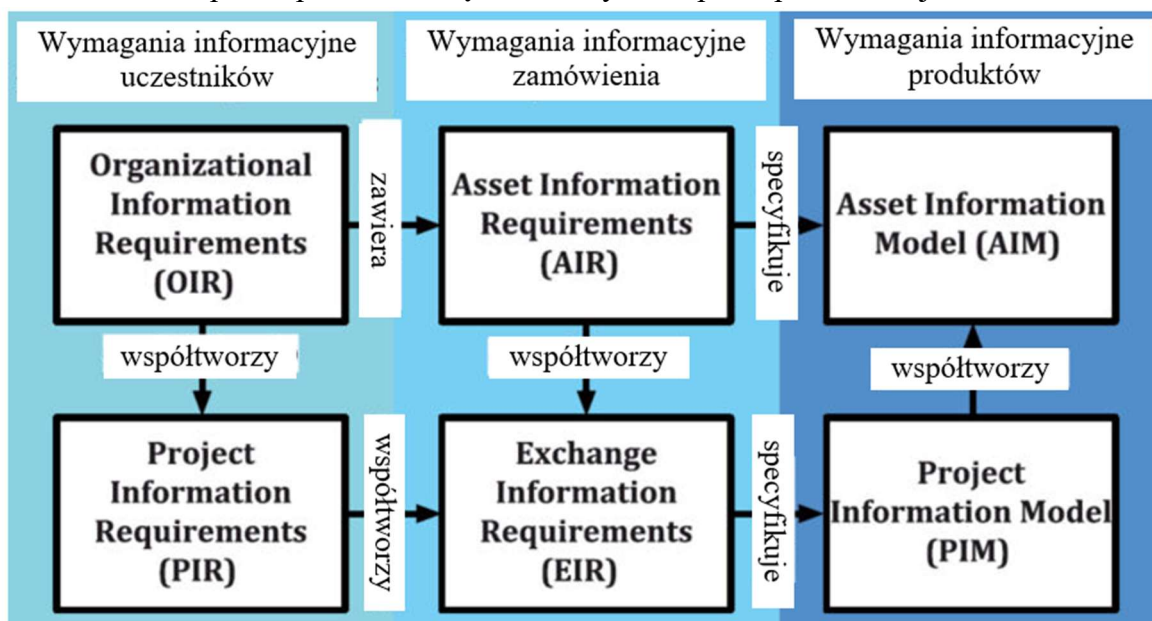
Relacje pomiędzy interesariuszami powinny być definiowane w ramach odpowiednich dokumentów. Istotną rolę pełnią w tym procesie wymagania informacyjne, które determinują jakie informacje powinny zostać dostarczone w celu odpowiedniej nadbudowy informacyjnej modelu oraz obsługi poszczególnych procesów czy przypadków użycia. Jak wskazano w standardzie (ISO 19650-1:2018 - Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and principles, 2018), zamawiający powinien rozumieć jaka informacja jest wymagana, rozpatrując posiadane zasoby lub realizowane projekty w celu wsparcia organizacji (przedsiębiorstwa) czy osiągnięcia celów projektu. Idąc dalej, wykonawca bądź główny wykonawca powinien rozszerzać wymagania informacyjne o swoje wymagania w celu zdefiniowania wymagań dla podwykonawcy. Tworzone są więc w ten sposób różne poziomy definiowania wymagań, w zależności od branży czy dojrzałości poszczególnych interesariuszy oraz potrzeby informacyjnej. Jednak zawsze końcowym uczestnikiem tego procesu nadbudowy informacyjnej jest zamawiający, który podejmuje decyzje na podstawie dostarczonych informacji na zdefiniowanym etapie od głównego wykonawcy, który znowu zebrał wytworzoną informację od podwykonawców.

Schemat wytwarzania różnego rodzaju wymagań informacyjnych oraz modeli informacyjnych został przedstawiony poniżej na Rys. 9. Rozpatrując każdy z elementów osobno:

- OIR (Organizational Information Requirements) – wymagania ze względu na aspekty strategiczne (zarządzanie zasobami czy operacje biznesowe), synergii z innymi projektami (portfel projektów) czy kwestie regulacyjne.
- AIR (Asset Information Requirements) – wymagania informacyjne dotyczące zasobów, czyli wszelkiego rodzaju wymagania informacyjne potrzebne do efektywnego

zarządzania aktywami w całym cyklu życia obiektu, AIR jest zawarty w OIR oraz stanowi wsad do AIM (specyfikuje)

- PIR (Project Information Requirements) – wymagania informacyjne, które są niezbędne do zarządzania projektem na różnych etapach jego realizacji. Określa, jakie informacje są potrzebne w trakcie planowania, realizacji, kontroli i zamknięcia projektu, w tym podczas podejmowania kluczowej decyzji. Bazuje na OIR.
- EIR (Exchange Information Requirements) – określa, jakie informacje muszą być wymieniane pomiędzy interesariuszami w określonych momentach realizacji projektu. Definiuje standardy wymiany danych oraz formaty, w których te informacje muszą być dostarczone, a także opisuje specyfikację techniczną dotyczącą przekazywania tych danych. Odpowiada wymaganiom PIR oraz AIR.
- PIM (Project Information Model) – projektowy model informacyjny, czyli cyfrowa reprezentacja informacji powstającej w trakcie realizacji projektu na bazie EIR
- AIM (Asset Information Model) – model eksploatacyjny, który jest cyfrową reprezentacją zasobu organizacji powstały na bazie PIM oraz specyfikacji AIR, mający na celu wsparcie procesu zarządzania aktywami po etapie realizacji.



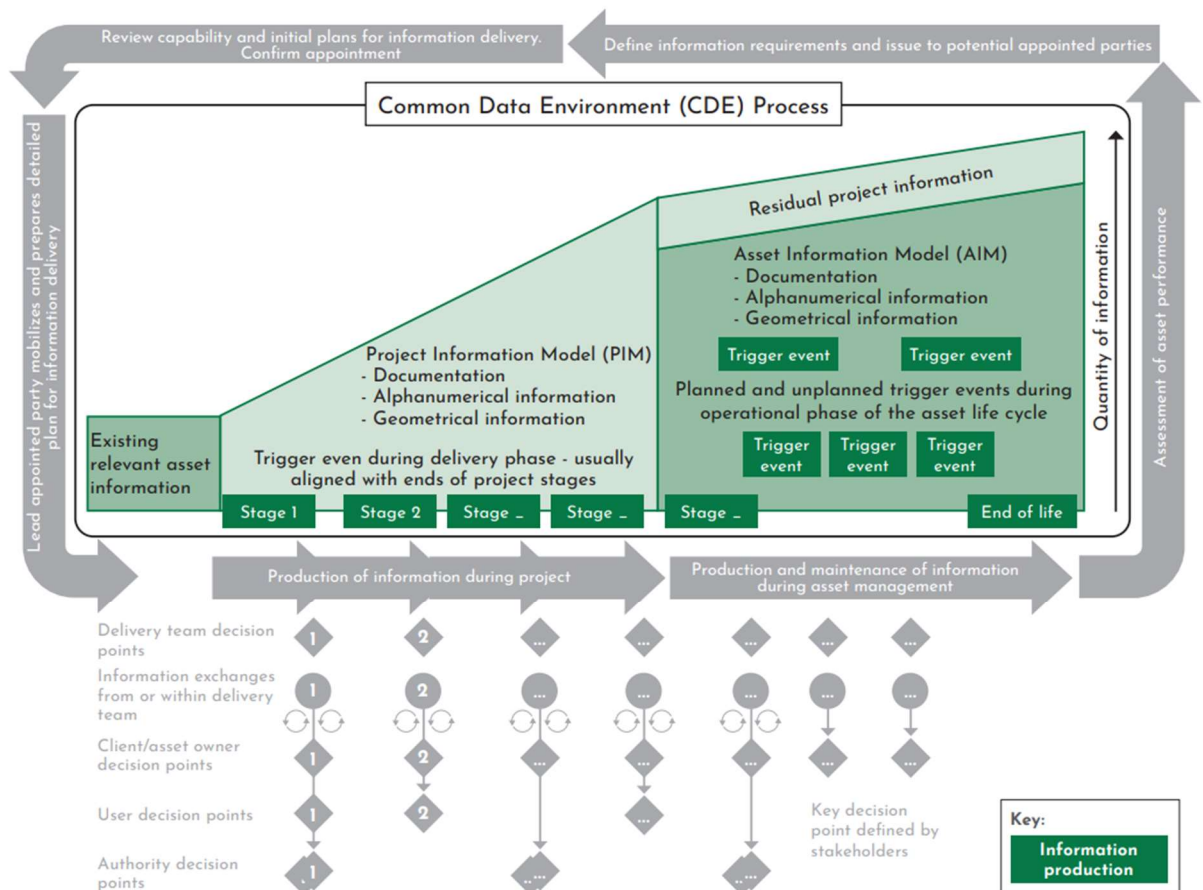
Rysunek 9 Wytwarzanie wymagań informacyjnych oraz modeli informacyjnych w ramach ISO 19650

Rozpatrując plan dostarczania informacji, standard ISO 19650 (ISO 19650-1:2018 - Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and principles, 2018) definiuje listę warunków jakie powinna spełniać informacja zawarta w takim planie oraz na jakie pytania powinna odpowiadać. Główną jednostką przekazywania informacji są kontenery informacyjne, które powinny zawierać wszystkie elementy wynikające z planu dostarczania informacji. Struktura podziału oraz strategia federacji dla kontenerów informacyjnych ma wspomóc planowanie, koordynację i podział zadań pomiędzy poszczególne zespoły zadaniowe oraz definicję odpowiedzialności, a także umożliwić m.in. równoczesną pracę. Poziomą granulację jest zależny od wymagań oraz częstotliwości potrzeby dostarczania informacji i powinien być zdefiniowany przez zamawiającego.

Cykl dostarczania informacji jest determinowany przez zdefiniowane kolejne iteracje nadbudowy informacyjnej w ramach planu dostarczania informacji. Kolejne iteracje zarówno w początkowej jak i w końcowej fazie powinny podlegać weryfikacji i walidacji. Elementem, który stanowi spoiwo pomiędzy interesariuszami oraz jest bazą do zarządzania informacją cyfrową w BIM jest CDE (Common Data Environment) – Wspólne Środowisko Danych, zarządzane przez zamawiającego. Jednakże poszczególne zespoły zadaniowe, mogą mieć również swoje własne CDE. Sama platforma powinna spełniać wymagania zamawiającego co do zarządzania informacją i wpisywać się w kulturę organizacyjną. Wśród podstawowych elementów, które powinna posiadać CDE to zarządzanie stanem informacji (np. kontenerem informacji), klasyfikacja informacji na podstawie przypisanych metadanych, możliwość kontroli i rewizji, poziomy dostęp do poszczególnych informacji. Rozpatrując stany informacji można wyróżnić cztery podstawowe: praca w trakcie (*work in progress*) – informacja jest wytwarzana przez zespoły zadaniowe i tylko w ramach tych zespołów jest do niej dostęp, udostępniona (*shared*) – informacja została zaakceptowana do udostępniania z pozostałymi interesariuszami w ramach zespołu zadaniowego, opublikowana (*published*) informacja została autoryzowana do wykorzystania w dalszych pracach oraz informacja, które podlegają archiwizacji (*archive*). Poprzez metadane rozumiane są dane opisowe docelowe dane umożliwiające jednoznaczną identyfikację elementu wymiany informacji czy zarządzanie dostępem na podstawie zdefiniowanych kodów identyfikacyjnych. Natomiast informacja o rewizji umożliwia wersjonowanie oraz monitorowanie zmian w celu śledzenia przyrostu informacyjnego, weryfikacji poprawności, wprowadzeniu zmian czy koordynacji.

Poza tymi elementami, funkcjonalności CDE mogą być właściwie dowolne i realizowane w dowolnym środowisku. Muszą one jednak spełniać wymagania głównego zarządcy CDE (zamawiającego) oraz umożliwiać przeprowadzanie zdefiniowanych procesów. CDE może również stanowić niejako repozytorium plików oraz miejsce realizacji różnych procesów, w tym, w przyszłości, integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych (Clemen, 2022).

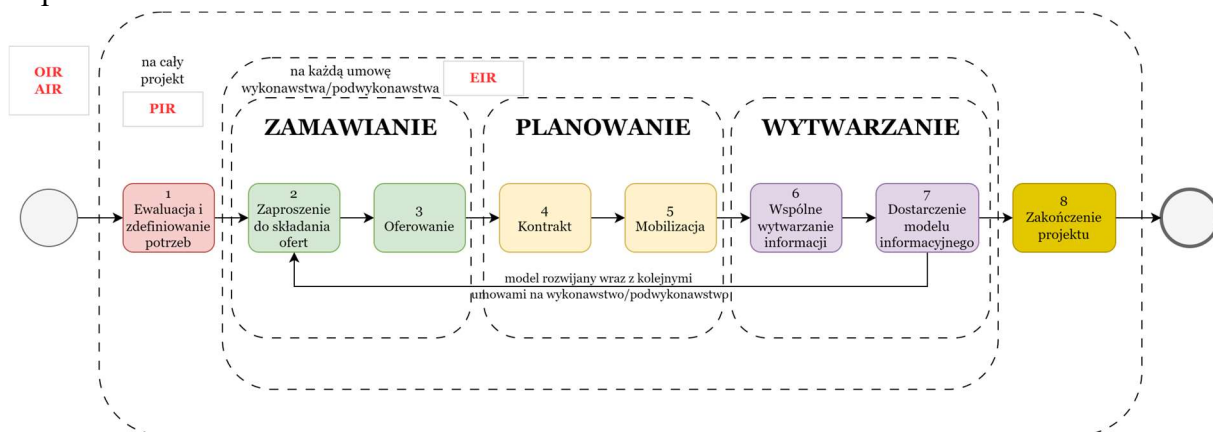
Poniżej na rysunku (Rys. 10) przedstawiono całościowy schemat wymiany informacji w oparciu o CDE.



Rysunek 10 Proces zarządzania informacją w ramach ISO 19650-1 oraz CDE (ISO 19650-1:2018 - Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and principl, 2018)

Druga część standardów ISO 19650 (ISO 19650-2:2018 - Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 2: Delivery phase of the, 2018) definiuje oraz charakteryzuje poszczególne etapy dostarczania informacji (Rys. 11). Ponadto opisane zostały aspekty dotyczące procesów zarządzania informacją przede wszystkim w kontekście działań związanych z wspólnym wytwarzaniem informacji celem minimalizacji działań nieproduktywnych. Wskazywane są również zasoby potrzebne do poszczególnych działań. Wśród najważniejszy terminów, które należy omówić jest m.in. BEP, MIDP oraz TIDP. BEP (BIM Execution Plan) – Plan Wykonania BIM – to odpowiedź wykonawcy na EIR wypracowany przez np. zamawiającego, definiujący kompetencje (np. osoby z doświadczeniem), propozycję strategii związanych z zarządzaniem informacją czy metody w jaki sposób informacja będzie wytwarzana oraz dostarczana. Po wyborze głównego wykonawcy także on definiuje własny EIR dla celów podwykonawców, którzy dostarczają BEP, na którego podstawie mogą być wybierani. Sam EIR oraz BEP jest również podstawą do TIDP (Task Information Delivery Plan) – Zadaniowy Plan Dostarczania Informacji, w ramach którego definiowany jest plan, określający jaka informacja i kiedy ma zostać dostarczona. TIDP jest osobny dla każdego zespołu zadaniowego. Jednakże całość podlega syntezie w ramach MIDP (Master Information Delivery Plan) – Główny Plan

Dostarczania Informacji, na bazie którego możliwe jest stworzenie macierzy odpowiedzialności.



Rysunek 11 Etapy realizacji projektu według ISO 19650-2 (opracowano na podstawie (ISO 19650-2:2018 - Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 2: Delivery phase of the, 2018))

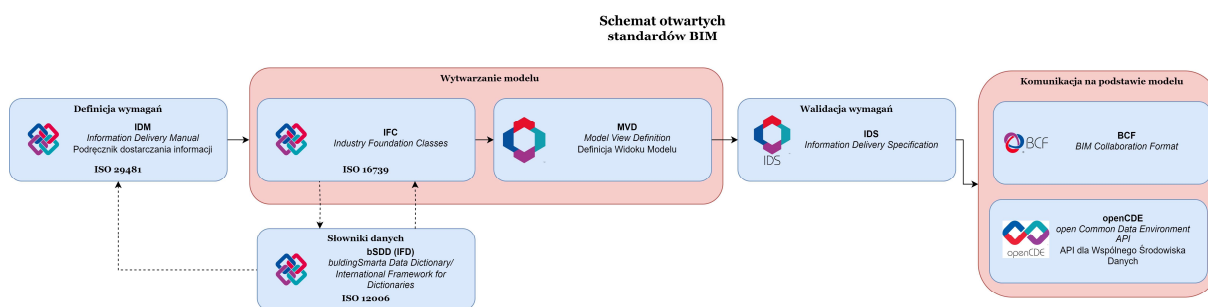
III.1.3 Formaty i standardy dotyczące danych w metodyce BIM

III.1.3.1 Otwarte standardy BIM

Interoperacyjność jest kluczowym aspektem patrząc z perspektywy cyfryzacji procesów w branży budowlanej. W idealnej sytuacji powinna się objawiać bezstratną komunikacją pomiędzy interesariuszami budowlanego procesu inwestycyjnego (od koncepcji po rozbiórkę). Utrata informacji na którymś z etapów niewątpliwie jest źródłem dodatkowych kosztów patrząc z perspektywy kosztów TOTEX. Brak informacji, jej utrata bądź błędna informacja na którymś z etapów nie objawia się tylko w krótkim czasookresie, ale również, a nawet przede wszystkim, jest najbardziej kosztowna w długim okresie. Stąd też potrzeba standaryzacji wymiany informacji w procesie budowlanym, jak i budowy narzędzi umożliwiających walidację i weryfikację poprawności zawartej informacji. Odpowiedzią na te problemy jest wykorzystywanie standardów otwartych BIM w celu zapewnienia neutralności technologicznej czy transparentności w wymianie informacji, zamiast stosowania natywnych formatów. Poniżej zostały przedstawione poszczególne z otwartych standardów BIM (Rys. 12), do których, przy opisie algorytmów łączących cyfrowe dane budowlane oraz geoprzestrzenne, będzie następować odwołanie.

Poniższe opisy zostały wykonane na podstawie poszczególnych standardów, opisów technologii na stronie organizacji buildingSMART (buildingSMART, 2024c), podręczników (Eichler i in., 2023), (Domer & Bernardello, 2023) czy (Piwkowski i in., 2020) oraz własnych analiz.

Co do zasady, otwarte standardy BIM mają na celu implementację idei opisanych w ramach standardów ISO 19650-1 oraz ISO 19650-2.



Rysunek 12 Schemat zależności pomiędzy otwartymi standardami BIM w procesach zarządzania informacją

A. IDM

IDM – Information Delivery Manual – ISO 29481 – standard definiujący procesy wymiany informacji, wspierający opis wymagań informacyjnych w ramach zdefiniowanych przypadków użycia, określający role oraz zadania, działania do wykonania, specyfikujący informacje, która ma zostać wymieniona, bądź dostarczona, tworzący podstawę do weryfikacji informacji z wykorzystaniem np. IDS.

Wymiana modeli i informacji o modelach pomiędzy interesariuszami (np. w ramach zespołów wykonawczych) o różnym podejściu, doświadczeniu czy kulturze organizacyjnej wymaga technicznie dobrze zdefiniowanych opisów, terminologii i interfejsów. IDM w tym celu proponuje wykorzystanie notacji BPMN (Business Process Modeling Notation), ustandaryzowanej przez normę ISO 19510:2013, w celu zamodelowania map procesów i zdefiniowania przepływów informacji oraz wymagań dla zdefiniowanych przypadków użycia BIM.

Interesariusze (w szczególności zamawiający) muszą zdefiniować jakich informacji będą potrzebować w celu obsługi danego procesu. Rezultatem tych działań powinien być dokument obrazujący procesy (np. z wykorzystaniem map procesów) oraz wymagania informacyjne (EIR) dla zdefiniowanych przypadków użycia wraz z definicją przepływów informacji i poziomem szczegółowości informacyjnej (LOIN). W ten sposób definiowany jest zakres oraz typ wymagań informacyjnych, które muszą być dostarczone przez określonych aktorów (interesariuszy) w zdefiniowanym czasie.

Można więc stwierdzić, że IDM jest odpowiedzialny za definiowanie MVD (Model View Definition), IDS (Information Delivery Specification) w oparciu również o bSDD (buildingSMART Data Dictionary).

Organizacja buildingSMART prowadzi również serwis do zarządzania przypadkami użycia (UCM – Use Case Management), która może pozwolić na łatwiejszą implementację poszczególnych przypadków użycia na bazie opisanych dobrych praktyk.

B. IFC

Za standaryzację wymiany informacji w BIM odpowiedzialny jest standard IFC (Industry Foundation Classes) – (ISO 16739-1:2024 - Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries — Part 1: Data schema, 2024) opracowany przez IAI (International Alliance for Interoperability), a rozwijany obecnie przez buildingSMART.

Schemat IFC posiada kilka wersji obecnie uznawanych jako oficjalne:

- IFC 2x3 (ISO 16739-2005)
- IFC 4 (ISO 16739-2018)
- IFC 4x3 (ISO 16739-2024)

Struktura każdej z wersji jest zbliżona do siebie, jednakże ilość instancji umożliwiających opisanie obiektów, procesów czy danych alfanumerycznych rośnie wraz z każdą kolejną implementacją schematu. Obrazując to na liczbach, ilość możliwych klas w poszczególnych wersjach wynosiła odpowiednio: w IFC 2x3 – 653 klasy, w IFC 4 – 776 klas oraz w IFC 4x3 – 876 klas. Jednakże rozpatrując także zestawy właściwości i relacje różnice te będą jeszcze większe. Przykładowo, analizując georeferencję, w wersji IFC2x3 informacja o wykorzystanym układzie współrzędnych musiała być zapisana poprzez stworzony własny zestaw właściwości dołączony do klasy np. *IfcProject*, w wersji IFC4 wprowadzono klasę *IfcProjectedCRS*, natomiast w wersji IFC4x3 dodano jeszcze klasę *IfcGeographicCRS*. Ponadto wersja IFC4x3 posiada w swoich strukturach klasy odpowiedzialne za opis i modelowanie informacji o obiektach infrastrukturalnych. W wersji IFC4 czy IFC2x3 musiały być one opisywane klasami generycznymi typu *IfcBuildingElementProxy*, definiującymi obiekty nie uwzględnione w schemacie.

Rozpatrując strukturę schematu IFC, składa się on z warstw informacyjnych. Każda z nich pełni określoną rolę w strukturze modelu, odpowiadając za różne aspekty związane z zarządzaniem danymi w procesie projektowania, realizacji i eksploatacji obiektów budowlanych. Można wyróżnić następujące warstwy:

- ogólna (*CORE LAYER*) – zawierająca uogólnione definicje klas oraz przypisująca globalne identyfikatory,
- specjalistyczna (*DOMAIN LAYER*) - zawiera schematy dla celów modelowania specjalistycznych informacji o produktach, procesach czy zasobach,
- interoperacyjności (*INTEROPERABILITY LAYER*) – zawiera schematy dla celów modelowania ogólnych informacji o produktach, procesach czy zasobach,
- zasobów (*RESOURCE LAYER*) – najniższa warstwa definiująca podstawowe typy, zestawy właściwości czy metody reprezentacji.

Patrząc przez pryzmat informacji jaka jest potrzebna podczas prowadzenia prac w procesie inwestycji budowlanej, należy przede wszystkim wyróżnić aspekty dotyczące reprezentacji geometrycznej, identyfikacji komponentów, opisu obiektów czy procesów oraz relacji pomiędzy nimi występującymi. Struktura schematu umożliwia modelowanie tych informacji. Sam schemat jest opisany z wykorzystaniem standardu STEP, bazującego na EXPRESS dla celów modelowania informacji (jest to istotna różnica w stosunku do modelowania informacji w domenie geoprzestrzennej – tam wykorzystywany jest głównie język UML (Unified Modeling Language)). W ten sposób zdefiniowana jest ontologia schematu IFC.

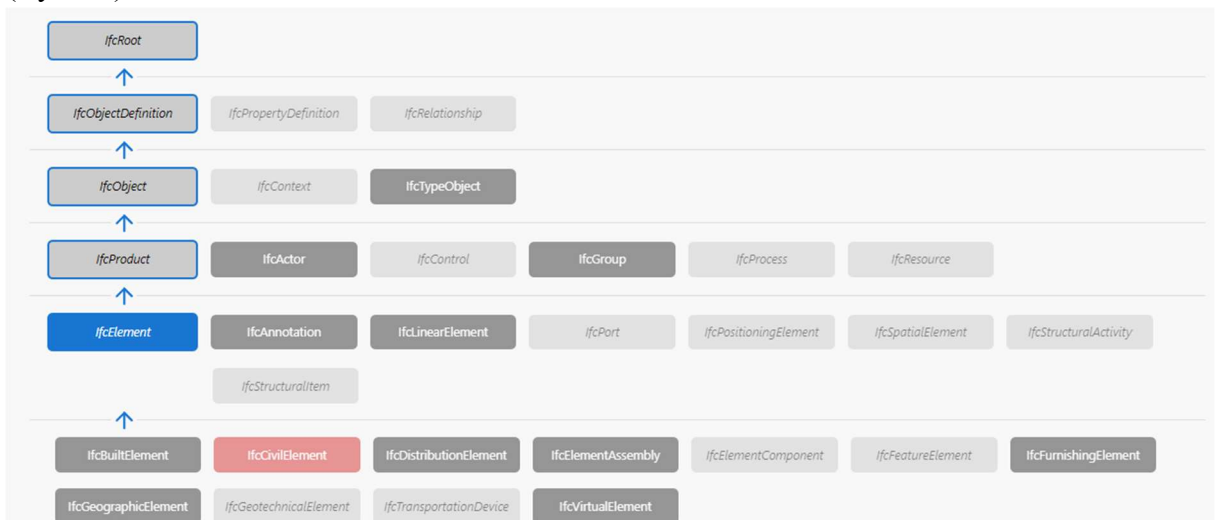
Podejście obiektowe to kolejny zwrot opisujący schemat IFC. Obiektowość objawia się przede wszystkim występowaniem klas opisujących abstrakcyjne (modelujących informacje dotyczące kosztu czy czasu), bądź rzeczywiste byty (opisujące rzeczywiste obiekty jak np. ściana, poręcz czy belka). Ponadto obiekty te mogą posiadać atrybuty oraz, co szczególnie

istotne, relacje z innymi obiektami, które są również określane przez zdefiniowane klasy. W ten sposób opisana jest taksonomia schematu.

Schemat IFC jest niewątpliwie skomplikowaną strukturą, jednakże występujące pomiędzy rzeczywistymi obiektami relacje również są nierzadko bardzo złożone.

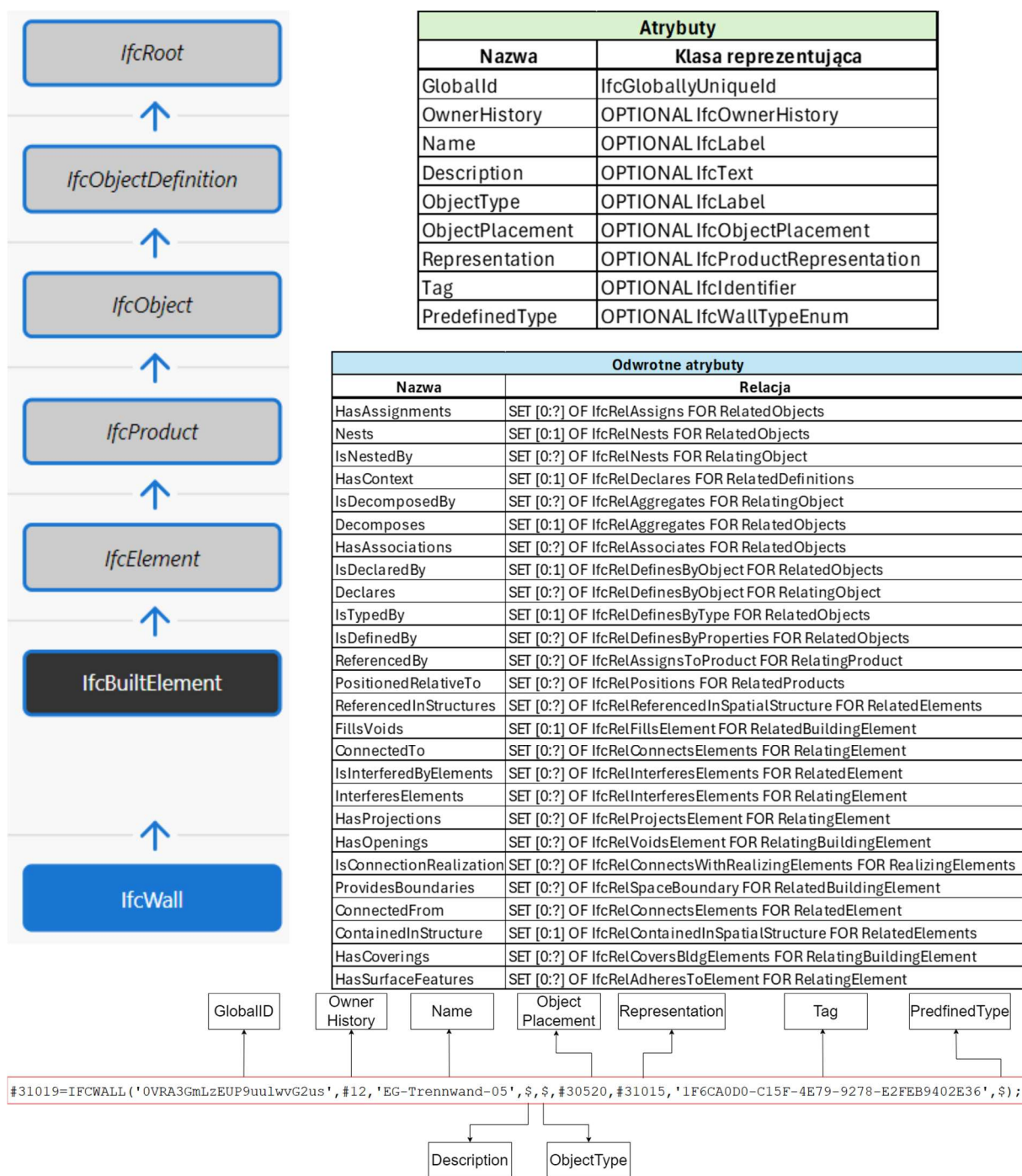
Podstawową relacją jaka występuje pomiędzy obiektami to dziedziczenie. Oznacza to, że obiekty niższych klas „dostają” informacje od wyższych klas. Dziedziczenie może odbywać się na różnych poziomach. Standardowy, wynikający ze schematu IFC został zaprezentowany na Rys. 13. Ale występują również bardziej zagnieźdzone w schemacie relacje dziedziczenia. Patrząc z perspektywy budowy rozwiązań geoprzestrzennych takim przykładem może być definiowana przez klasy dziedziczone po *IfcSpatialElement* struktura relacji (*IfcRelContainedInSpatialStructure*) pomiędzy układami współrzędnych (szczegółowo opisana w sekcji IV.4).

Inne typy relacji to dekompozycja (*IfcRelDecomposes*), połączenie (*IfcRelConnects*), przypisanie (*IfcRelAssigns*), asocjacja (*IfcRelAssociates*), deklaracja (*IfcRelDeclares*) czy definicja (*IfcRelDefines*). Relacje te są najczęściej definiowane przez atrybuty odwrotne (Rys. 14).



Rysunek 13 Schemat dziedziczenia w IFC dla klasy *IfcElement* (buildingSMART, 2024a)

Można więc podsumować, że format IFC składa się z obiektów (klas), które posiadają atrybuty oraz relacje, które mogą być również reprezentowane przez klasy. Jednakże z perspektywy integracji z danymi geoprzestrzennymi czy też konwersji do formatów danych wykorzystywanych w domenie geoprzestrzennej, najważniejszymi elementami jest reprezentacja geometryczna (atrybut wszystkich klas dziedziczonych po klasie *IfcProduct*), dane opisowe (atrybuty charakteryzujące poszczególne obiekty) oraz zapis relacji przestrzennej (w tym, w szczególności georeferencji). Te elementy zostaną przeanalizowane szczegółowo w dalszej części niniejszej pracy. Natomiast poniżej, dla celów lepszej wizualizacji poszczególnych aspektów opisanych w niniejszej sekcji została przedstawiona szczegółowa analiza dla klasy *IfcWall* (Rys. 14).



Rysunek 14 Schemat relacji w ramach klasy `IfcWall` w strukturze IFC wraz z przykładem zapisu w pliku IFC

Ze względu na skomplikowaną strukturę formatu IFC został również opracowany przez społeczność, zajmującą się wytwarzaniem oprogramowania BIM, otwarty źródłowy format `.dotbim`, który ma strukturę słownikową, opisującą przede wszystkim informacje geometryczne oraz podstawowe informacje alfanumeryczne (*paireks/dotbim: Minimalist file format for BIM*, 2024). Jednak na ten moment nie jest to globalnie wykorzystywany format.

C. bSDD/IFD

Serwis bSDD – buildingSMART Data Dictionary jest produktem buildingSMART bazującym na standardach IFD (ISO 12006). BSDD jest słownikowym zbiorem danych przedstawiających terminologię, definicje oraz relacje pomiędzy terminami związanymi

z budowlanym procesem inwestycyjnym. Celem bSDD jest ujednoczenie wymiany informacji np. dla współpracujących interesariuszy reprezentujących różne narodowości i stosujących odmienne systemy klasyfikacyjne czy pomoc w definicji wymagań informacyjnych. Przykładem może być tutaj schemat IFC, który dla najnowszej wersji 4x3 jest również reprezentowany jako słownik danych w bSDD. W ten sposób zaimplementowano zestawy właściwości, klasy czy relacje pomiędzy nimi. W analogiczny sposób możliwe jest definiowanie innych obiektów, ich atrybutów, relacji czy zestawów właściwości. Ponadto możliwe jest wytwarzanie czy implementacja systemów klasyfikacyjnych i struktur danych, które mogą następnie być wykorzystywane podczas definicji wymagań informacyjnych. Co więcej, wykorzystanie bSDD może umożliwiać automatyczne uzupełnianie atrybutów czy zestawów właściwości na podstawie zdefiniowanych kluczy i zbiorów zasad.

D. MVD

MVD – Model View Definition – Definicja Widoku Modelu – specyfikacja służąca filtracji schematu IFC w celu eksportu informacji kluczowych dla zdefiniowanego zastosowania np. opisanego w ramach IDM. W ten sposób z całego schematu IFC wybierany jest podzbiór informacji (klas), który ma zostać zapisana do docelowego pliku IFC. Ponadto możliwy jest zapis zdefiniowanej reprezentacji geometrycznej (komponent w IFC może mieć kilka typów reprezentacji).

Podczas zarządzania informacją, istnieją procesy, dla których część informacji może być zbędna lub nawet przeszkadzać czy wydłużać czas przetwarzania. MVD zapewnia więc dostarczenie odpowiedniego zakresu informacji dla zdefiniowanego zadania. Każdy plik IFC posiada w nagłówku informację o zastosowanym MVD, w celu łatwej identyfikacji.

Wraz z schematami danych wytwarzane są również domyślne, i tak dla IFC w najnowszej oficjalnej wersji (IFC 4x3) są to: widok referencyjny (*Reference View*), widok referencyjny oparty na osi i niwelecie (*Alignment Based Reference View*), widok transferu projektu (*Design Transfer View*).

Z technologicznego punktu widzenia, MVD jest modelowany z wykorzystaniem XML. Poza domyślnymi MVD dla poszczególnych wersji schematu IFC, możliwe jest również tworzenie własnych (wymaga to jednak wsparcia również przez oprogramowanie), ale także możliwa jest weryfikacja informacji na podstawie MVD.

E. IDS

IDS – Information Delivery Specification – Specyfikacja Dostarczania Informacji - to specyfikacja umożliwiająca określenie wymagań informacyjnych zarówno w sposób czytelny dla człowieka, jak i interpretowalny przez komputer. Powstaje na bazie wymagań wymiany informacji (EIR). Jego celem jest optymalizacja przepływu informacji, minimalizacja błędów oraz zwiększenie efektywności komunikacji poprzez możliwości walidacji modelu. Od strony technologicznej jest to spis wymagań w formie znaczników XML. IDS skupia się przede wszystkim na danych alfanumerycznych. Określa jakie właściwości z jaką zawartością (np. wartością) powinny ostatecznie zostać przypisane do poszczególnych obiektów modelu. Może być więc traktowany jako weryfikator poziomu zawartości informacyjnej w ramach LOIN/LOI.

Posiadając IDS, czyli EIR w formie czytelnej dla komputera, możliwe jest testowanie modelu w celu zatwierdzenia bądź wykrycia nieprawidłowości w stosunku do wymagań

informacyjnych. Stopień pokrycia testami oraz ich rodzaj może być różny, w zależności od potrzeb zamawiającego oraz poziomu rozbudowy wymagań. W porównaniu do podejścia klasycznego, który bazuje na wymaganiach w postaci dokumentów pisanych np. w formie ciągłego tekstu, IDS umożliwi automatyzację weryfikacji informacji i w efekcie dostarczenie informacji o większej jakości.

W ramach IDS możliwe jest zdefiniowanie wymagań dotyczących atrybutów, zestawów właściwości, materiałów, klasyfikacji, typów (np. odpowiednich klas) czy zależności. Są to więc wymagania dotyczące przede wszystkim informacji alfanumerycznych. Na ten moment nie możliwe jest budowanie wymagań dotyczących szczegółowej geometrii komponentów. Natomiast możliwa jest m.in. weryfikacja czy dany obiekt posiada geometrie.

F. BCF

BCF – BIM Collaboration Format – Format Współpracy BIM – format wymiany informacji na bazie modelu IFC, umożliwiający prowadzenie i śledzenie komunikacji na temat problemów czy zmian związanych z modelem. Usprawniany jest w ten sposób proces koordynacji czy też ustalania zmian i dyskusji na temat np. przebiegu danego komponentu czy zastosowanego rozwiązania. Format pozwala na przekazywanie informacji (z wykorzystaniem XML) takich jak komentarze, odniesienie do komponentu poprzez globalny identyfikator (*GlobalID*) i lokalizację czy rzut obrazu modelu dla obszaru, w którym występuje przedmiotowy komponent bądź komponenty. BCF jest często wykorzystywany podczas przeprowadzania procesów takich jak analiza kolizji w celu oznaczenia elementów podlegających kolizji czy nawet zarządzanie zadaniami związanymi z nadbudową informacji modelowej.

G. OpenCDE

OpenCDE – Open Common Data Environment – Otwarte Wspólne Środowisko Danych, to idea mająca na celu stworzenie schematu komunikacji oraz technologii opartej na otwartym API dla celów wymiany informacji. W klasycznym podejściu, aktualizacja poszczególnych plików bądź działania muszą być wykonywane w sposób ręczny, co może być źródłem błędów czy nieefektywności. OpenCDE ma pozwolić na realizację tych zadań np. bezpośrednio z oprogramowania dla dowolnej platformy CDE (od każdego certyfikowanego dostawcy). Ponadto podczas wysyłania informacji, na bazie rozwiązań bazodanowych, rejestrowane są tylko zmiany, nie jest wczytywany cały plik, co znowu powoduje ograniczenie w ilości przesyłanych danych.

III.1.3.2 Poziomy szczegółowości informacyjnej oraz geometrycznej

Istotny aspektem rozpatrując BIM jest również dostarczanie odpowiednich informacji w odpowiednim czasie. W tym celu zostały zdefiniowane poziomy szczegółowości informacyjnej, które wraz z wymaganiami informacyjnymi (EIR) oraz podręcznikami dostarczania informacji (IDM) mają zapewnić odpowiedni przyrost informacji dostosowany do potrzeb projektu.

Najczęściej obecnie stosowanym standardem jest LOIN (Level of Information Need) definiowany przez BS EN 17412-1:2020 (BS EN 17412-1:2020 Building information modelling - level of information need. Concepts and principles, 2020) oraz ISO 7817-1:2024

(ISO 7817-1:2024 Building information modelling — Level of information need Part 1: Concepts and principles, 2024), który determinuje poziom granulacji informacji w takich aspektach jak: geometria, informacja alfanumeryczna oraz dokumentacja. Natomiast w samym jej opisie powinna być zawarta informacja o celu wymiany, kamieniu milowym, dostawcy i odbiorcy, przedmiocie wymiany i poziomie granulacji (*ang. breakdown structure*) oraz charakterystyce informacji. Ogólnie rzecz biorąc, LOIN powinien być ustalony pomiędzy podmiotami (aktorami) podczas uzgadniania procesu dostarczania informacji.

Informacja geometryczna powinna mieć zdefiniowane parametry takie jak szczegółowość, wymiarowość, lokalizacja, wygląd oraz zachowanie parametryczne. Przez szczegółowość może być rozumiany poziom szczegółowości geometrycznej (LOD), definiujący złożoność geometryczną w odniesieniu do rzeczywistego obiektu. Wymiarowość opisuje ilość wymiarów przestrzennych wykorzystanych do opisu obiektu (np. 0D, 1D, 2D, 3D), która może wzrastać np. wraz z nadbudową informacyjną modelu. Lokalizacja opisuje pozycje i orientacje obiektu – względem punktu referencyjnego lub względem innego obiektu. Wygląd opisuje wizualną reprezentację obiektu jako kontinuum od symbolicznego przedstawienia do rzeczywistego obiektu. Zachowanie parametryczne opisuje, czy kształt, położenie i orientacja są tworzone tak, aby pozostały zależne od innych informacji związanych z obiektem lub kontekstem, w którym obiekt jest umieszczony, umożliwiając pełną lub częściową rekonfigurację.

Informacja alfanumeryczna (LOI) natomiast odnosi się do poziomu szczegółowości informacyjnej definiującej aspekty w szczególności dotyczące:

- informacji identyfikacyjnych umożliwiających jednoznaczną identyfikację obiektu poprzez nazwę, typ, klasyfikacje, kod czy referencje,
- zawartości informacyjnej, czyli wymagań dotyczących właściwości obiektu (np. jaki zestaw właściwości powinien być przypisany do obiektu).

Ostatnią z części jest dokumentacja, która może być wykorzystywana do wspomagania procesów decyzji, akceptacji i weryfikacji dostarczanej informacji, ale również dla celów budowy AIR.

Docelowa forma LOIN powinna być definiowana w sposób czytelny zarówno przez komputer jak i człowieka, w celu np. automatycznej weryfikacji informacji poprzez budowę specyfikacji IDS.

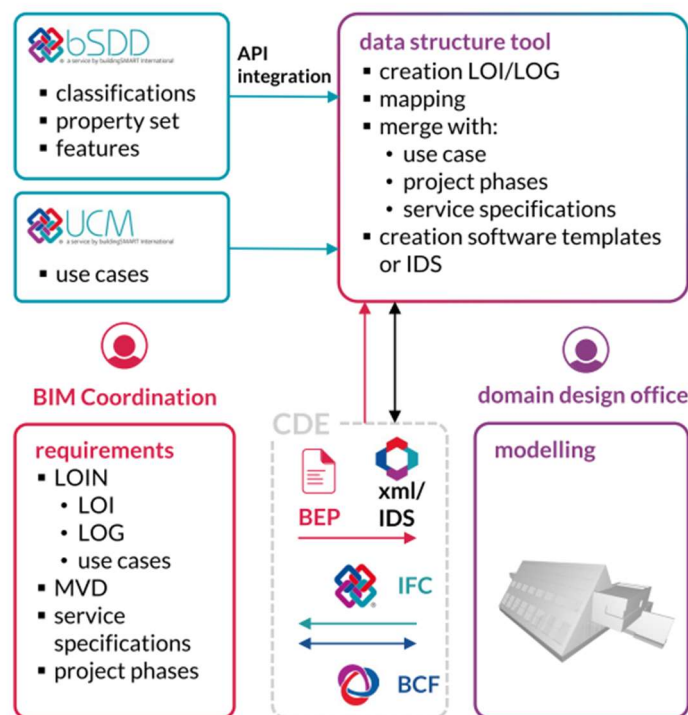
Od strony branży geoprzestrzennej mogą wystąpić również parametry dotyczące statusu, tolerancji, dokładności oraz pewności jako elementy charakteryzujące dany obiekt (np. dla potrzeb tyczenia obiektu). Przykładowym elementem opisującym poziom wymaganej dokładności może być wskaźnik LOA (Level Of Accuracy) opisany w (USIBD, 2016).

III.1.4 Synteza – zarządzanie informacją w BIM

Podsumowując aspekty zarządzania informacją w BIM. Standardy ISO z serii 19650, w szczególności część pierwsza i druga odnoszą się do fundamentalnych założeń dotyczących zarządzania informacją w metodyce BIM, wytwarzania wymagań informacyjnych, procesów dostarczania informacji czy zarządzania przyrostem informacyjnym z wykorzystaniem CDE. Same procesy nie muszą być realizowane w standardach otwartych, jednakże patrząc na rozdrobnienie rynku w zakresie istniejącego oprogramowania, jest to rozwiązanie zalecane i najczęściej wymagane przez zamawiających, w szczególności tych działających na podstawie

PZP (Prawa Zamówień Publicznych). W przypadku oparcia zarządzania informacją na bazie standardów otwartych zdefiniowanych jest szereg narzędzi umożliwiających bardziej efektywną komunikację oraz zapewnienie jakości procesów.

Łącząc założenia (ISO 19650) z technologicznymi odpowiednikami w ramach standardów otwartych czy wytycznych możliwy jest efektywny i niemal bezstratny proces wymiany informacji. Cała idea została zaprezentowana na rysunku poniżej (Rys. 15).



Rysunek 15 Zarządzanie informacją i wymaganiami informacyjnymi z wykorzystaniem otwartych standardów BIM (Eichler i in., 2023)

III.2 Budowlany proces inwestycyjny w ujęciu domeny geoprzestrzennej

III.2.1 Charakterystyka domeny geoprzestrzennej w ujęciu cyfrowych danych geoprzestrzennych

W niniejszej sekcji zostanie opisana charakterystyka poszczególnych elementów składowych cyfrowych danych geoprzestrzennych, szczególnie rozpatrując aspekt ich wykorzystania w ramach budowlanego procesu inwestycyjnego. Ponadto zostanie przeanalizowany wpływ cyfryzacji na zmiany w obszarze realizowanych zadań przez inżyniera geodetę w budowlanym procesie inwestycyjnym w ramach Geodezyjnej Obsługi Inwestycji.

Dla celu analizy wyodrębniono dwa podstawowe zbiory cyfrowych danych geoprzestrzennych: systemy GIS (Geographic Information System) oraz różnego rodzaju dane pomiarowe, jak i produkty pochodne tych pomiarów czy dane geodezyjne. Oba te zbiory mają nieco inną charakterystykę. Systemy GIS są to przede wszystkim ustrukturyzowane dane, które dostarczają informacji o nieco szerszym kontekście oraz mniejszej szczegółowości. Z drugiej strony produkty geodezyjne uzyskane np. poprzez przetworzenie różnego rodzaju danych

pomiarowych mogą być zdecydowanie bardziej szczegółowe i dostarczać informacji, podobnie jak w BIM, o pojedynczych elementach.

III.2.1.1 Systemy Informacji Geograficznej - Geographic Information System (GIS)

GIS stanowi najczęściej ustrukturyzowany system, służący do gromadzenia, zarządzania, analizowania, przechowywania oraz udostępniania danych geoprzestrzennych. W niniejszej sekcji opisano przede wszystkim GIS w ujęciu cyfrowych danych geoprzestrzennych, natomiast szczegółowo systemy GIS od strony zastosowania zostały opisane m.in. w (Gotlib i in., 2007).

Patrząc przez pryzmat rodzajów zbiorów danych, które są wykorzystywane w GIS można wyróżnić przede wszystkim dane wektorowe oraz dane rastrowe.

Dane wektorowe w GIS reprezentują obiekty geograficzne lub zjawiska za pomocą punktów, linii i wielokątów. Punkty mogą oznaczać pojedyncze lokalizacje, linie – drogi lub rzeki, a wielokąty – obszary takie jak jeziora czy granice administracyjne. Ponadto możliwe jest tworzenie trójwymiarowych reprezentacji wektorowych, co będzie przedmiotem analizy w dalszej części pracy.

Z kolei dane rastrowe składają się z pikseli tworzących macierz, gdzie każdy piksel reprezentuje wartość lub wartości zmiennych, takie jak wysokość terenu (np. Numeryczny Model Terenu), kolor w zdefiniowanym spectrum (np. ortofotomapa w paśmie widzialnym RGB; 8-kanalowe zobrazowanie teledetekcyjne) czy pokrycie terenu (na podstawie legendy), co umożliwi analizę zjawisk przestrzennych. Dane rastrowe mogą mieć różną charakterystykę przestrzenną (wielkość piksela terenowego), rozdzielczość radiometryczną czy spektralną (w przypadku zapisu danych teledetekcyjnych). Charakterystyka ta determinuje metody wykorzystania i użyteczność danego źródła obrazowego. Najczęściej do zapisu danych rastrowych wykorzystywany jest format GeoTiff, umożliwiający zapisanie informacji o układzie współrzędnych.

Kolejnym istotnym aspektem są metadane, czyli dane opisujące dane. W kontekście GIS metadane dostarczają informacji na temat źródła, dokładności, daty utworzenia, formatu i warunków użytkowania zbiorów danych przestrzennych. Dzięki metadansom użytkownicy mogą ocenić przydatność danych do określonych celów, śledzić ich pochodzenie i zapewnić odpowiednie zarządzanie oraz ich aktualizacje.

Z punktu widzenia standaryzacji za dane geoprzestrzenne odpowiedzialne są normy ISO z numerami 191XX (gdzie XX to cyfry od 0 do 9). na ich podstawie możliwe są do wyróżnienia 4 poziomy definiowania architektury danych w GIS:

- metamodele – dla GIS do definicji schematów danych wykorzystywany jest język UML (Unified Modeling Language) – ISO 19103, w ramach ISO 19101 czy też ISO 19109 opisywana jest ogólna idea Systemów Informacji Geograficznych,
- abstrakcyjne schematy pojęciowe – różnego rodzaju standardy definiujące pojęcia oraz charakteryzujące dane np. ISO 19107 dotyczący geometrii, ISO 19115-1 opisujący koncepcję metadanych dla GIS,
- pojęciowe schematy aplikacyjne – opisujące schematy danych i ich struktury już na poziomie aplikacji np. OGC (Open Geospatial Consortium) CityGML Schema dla celów zarządzania i budowy modeli trójwymiarowych miast, INSPIRE dla celów udostępniania i wymiany informacji na temat geoprzestrzennych zbiorów danych,

- schematy implementacyjne – formaty umożliwiające zapis danych w bazach danych czy też wymianę informacji np. CityGML czy też GML (ISO 19136).

Udostępnianie danych GIS może odbywać się poprzez bazy danych, różnego rodzaju schematy implementacyjne (formaty danych) czy w ramach usług zdefiniowanych przez OGC (Open Geospatial Consortium). Do najważniejszych usług OGC należą: WMS (Web Map Service), WCS (Web Coverage Service), WFS (Web Feature Service) oraz CSW (Catalog Service for Web). WMS pozwala na wyświetlanie i przeglądanie map jako obrazów rastrowych (dane wektorowe są konwertowane do reprezentacji rastrowych w celu wizualizacji). WCS udostępnia dane przestrzenne w formie pokryć rastrowych (z możliwością ich pobrania). WFS umożliwia przesyłanie i pobieranie pełnych obiektów przestrzennych w formie wektorowej (np. w formacie GML). CSW służy do przeglądania katalogów metadanych. Usługi te są kluczowe dla interoperacyjności i współpracy między różnymi systemami GIS, ułatwiając integrację i analizę danych. Pobranie danych do wyświetlania bądź bezpośrednio na dysk czy też serwer odbywać może się poprzez zapytania do usługi np. *GetCapabilities* pozwala na wyświetlenie charakterystyki usługi czy *GetMap* umożliwia uzyskanie rastra z mapą danej usługi WMS.

Patrząc z perspektywy Systemów Informacji Geograficznej, ważnym źródłem danych są różnego rodzaju zasoby prowadzone przez krajowe agencje kartograficzne czy też geodezyjne (NMA – ang. National Mapping Agency). W Polsce taką rolę pełni GUGiK (Główny Urząd Geodezji i Kartografii). Tego typu instytucje mają za zadanie prowadzenie zasobów geodezyjnych oraz kartograficznych, a także, w przypadku Unii Europejskiej na podstawie różnych dyrektyw (m.in. INSPIRE) oraz krajowych aktów prawnych, udostępniania części zasobów z wykorzystaniem kanałów otwartych bez potrzeby uiszczania opłat. Zasoby te są zróżnicowane, od danych wektorowych reprezentujących działki i budynki (Ewidencja Gruntów i Budynków) przez dane wektorowe zawierające informacje topograficzne (Baza Danych Obiektów Topograficznych odpowiednia dla skali 1:10000 – BDOT10k) po ortofotomapy (z pikselem terenowym osiągającym wartość kilku centymetrów), Numeryczne Modele Terenu (NMT), Numeryczne Modele Pokrycia Terenu (NMPT) czy chmury punktów z lotniczego skaningu laserowego (gęstość dochodząca do kilkunastu punktów na metr kwadratowy) (*Dane udostępniane przez Geoportal.gov.pl*, 2024). Dane te mogą być wykorzystywane zwłaszcza w początkowych fazach inwestycji dla budowy strategii inwestycji, koncepcji czy też identyfikacji i oceny ryzyka (Glinka i Owerko, 2021). Ponadto, nierzadko udostępniane są specjalistyczne dane obejmujące produkty analiz. Przykładem mogą być mapy zagrożenia i ryzyka powodziowego udostępniane przez instytucje Wody Polskie (Wody Polskie, 2024). W podobny sposób udostępniane są dane w innych krajach europejskich.

Dostępne są również globalne otwarte dane geoprzestrzenne. Przykładem mogą być tutaj: Open Street Map (OSM) tworzony przez społeczność portal mapowy reprezentujący w sposób wektorowy obiekty topograficzne, SRTM DEM (Shuttle Radar Topography Mission Digital Elevation Model) światowy model wysokościowy Ziemi (odniesiony do geoidy EGM-96) czy dane teledetekcyjne (np. zobrażenia optyczne Sentinel-2 lub radarowe Sentinel-1 udostępniane w ramach programu Copernicus).

Poniżej w sposób tabelaryczny (Tab. 2) zebrano zidentyfikowane otwarte dane geoprzestrzenne, która mogą być wykorzystywane podczas realizacji procesu budowlanego dla wsparcia różnorodnych zadań.

Tabela 2 Zidentyfikowane otwarte dane geoprzestrzenne dostępne dla terenu Polski, mogące być użyteczne w budowlanym procesie inwestycyjnym.

Nazwa danych otwartych	Organ odpowiedzialny (udostępniający)	Typ danych	Przeglądanie	Pobranie	Rozdzielczość (dokładność)	Aktualność
Ortofotomapa	GUGiK (Geoportal)	raster (ortofotomapa standardowa, ukośna, prawdziwa, CIR)	X (WMS)	X (WCS lub WFS - skorowidze)	różnorodna od nawet 5 cm	różnorodna w zależności od obszaru
Dane pomiarowe LiDAR	GUGiK (Geoportal)	chmura punktów (sklasyfikowana w układzie wysokościowym KRON86 lub EVRF2007)	X (WMS - skorowidze) lub wizualizacja przez geoportal na bazie potree	X (WFS - skorowidze)	różnorodna gęstość punktów, do kilkunastu punktów na m ²	różnorodna w zależności od obszaru
Numeryczny Model Terenu (NMT)	GUGiK (Geoportal)	raster (siatka grid w układzie wysokościowym KRON86 lub EVRF2007)	X (WMS np. cieniowanie)	X (WCS lub WFS - skorowidze)	oczko od 0.5x0.5m do 5x5m	różnorodna w zależności od obszaru
Numeryczny Model Pokrycia Terenu (NMPT)	GUGiK (Geoportal)	raster (siatka grid w układzie wysokościowym KRON86 lub EVRF2007)	-	X (WCS lub WFS - skorowidze)	oczko od 0.5x0.5m do 5x5m	różnorodna w zależności od obszaru
Baza Danych Obiektów Topograficznych dla skali 1:10000 (BDOT10k)	GUGiK (Geoportal)	wektor	X (wizualizacja reprezentacji wektorowej - WMS)	X (skorowidze)	definiowana przez rozporządzenie dotyczące BDOT	różnorodna w zależności od obszaru (docelowo bieżąca)
Ewidencja Gruntów i Budynków (EGiB)	Organ prowadzący/zgłaszający; GUGiK (rejestr)	wektor	X (WMS)	X (WFS)	definiowana przez rozporządzenie dotyczące EGiB	bieżąca
Baza Danych Obiektów Topograficznych dla skali 1:500 (BDOT500)	GUGiK (Geoportal)	wektor (podstawa); raster (wizualizacja)	X (wizualizacja bazy wektorowej WMS)	-	definiowana przez rozporządzenie dotyczące BDOT	bieżąca
Geodezyjna Ewidencja Sieci Uzbrojenia Terenu (GESUT)	GUGiK (Geoportal)	wektor (podstawa); raster (wizualizacja)	X (wizualizacja bazy wektorowej WMS)	-	definiowana przez rozporządzenie dotyczące GESUT	bieżąca
Dane Głównego Urzędu Statystycznego (GUS)	GUS	dane tabelaryczne	X (API, przeglądarka)	X (API)	informacja dla jednostek terytorialnych	bieżąca/archiwalna
Dane meteorologiczne IMGW	IMGW	różne	X (WMS, API, przeglądarka)	X (API)	różnorodna	bieżąca/archiwalna
Open Street Map (OSM)	OSM (społeczność)	wektor	X (wizualizacja bazy wektorowej API)	X (API)	różnorodna (w zależności od np. danych źródłowych)	bieżąca/archiwalna

Sentinel-2 (dane optyczne)	Program Copernicus	raster	X (WMS)	X (API)	od 10 metrów (w zależności od kanału spektralnego)	bieżąca/ archiwalna
Sentinel-1 (dane radarowe)	Program Copernicus	raster (również dane surowe - w zależności od poziomu produktu)	X (WMS)	X (API)	od około 5 metrów	bieżąca/ archiwalna
Mapy zagrożenia i ryzyka powodziowego	Wody Polskie, Otwarte Dane	wektor	X (wizualizacja bazy wektorowej WMS)	X (API)	nie dotyczy	ostatnia analiza 2022 rok
Zagospodarowanie terenu	Organ prowadzący/ zgłaszający	wektor; raster	X (WMS)	X (nie dla każdego obszaru)	nie dotyczy	bieżąca

III.2.1.2 Budowlany proces inwestycyjny – dane oraz produkty geodezyjne

Branża geodezyjna wykorzystuje różne rozwiązania pomiarowe do akwizycji danych, a następnie, na ich podstawie, do generowania różnorodnych produktów umożliwiających podejmowanie decyzji czy wsparcie działań w ramach budowlanego procesu inwestycyjnego. W niektórych obszarach działania te są krytyczne z punktu widzenia możliwości poprawnego przeprowadzenia inwestycji. Poza dostarczonymi produktami, geodezja ma również różnego rodzaju zadania związane ze wsparciem inwestycji, takie jak tyczenie obiektu czy weryfikacja poprawności realizacji. Całość zadań związanych z działaniami geodezyjnymi w budowlanym procesie inwestycyjnym może być określana jako Geodezyjna Obsługa Inwestycji (GOI). W Polsce zadania te są uregulowane przez Ustawę z dnia 17 maja 1989 roku Prawo Geodezyjne i Kartograficzne (PGiK) oraz Rozporządzenia z nią powiązane. W niniejszej sekcji zostaną opisane poszczególne etapy GOI w tradycyjnym ujęciu wraz z identyfikacją zadań oraz produktów, które mogą zostać wygenerowane podczas poszczególnych etapów prac. Ponadto opisano stosowane obecnie rozwiązania pomiarowe.

W początkowych etapach inwestycji prowadzone są głównie czynności przygotowawcze do inwestycji obejmujące koncepcję czy też prace związane z uregulowaniem prawnym nieruchomości. Mogą być to więc zadania przede wszystkim związane z katastrzem np. określenie granic działki, przeprowadzanie procesów rozgraniczeń czy podziałów nieruchomości, a także, w przypadku obiektów infrastrukturalnych, wsparcie w procesach związanych z wywłaszczeniami (Ustawa z dnia 21 sierpnia 1997 r. o gospodarce nieruchomościami). Ponadto do uregulowania mogą pozostać kwestie związane z miejscowym planem zagospodarowania przestrzennego.

Do prowadzenia analiz koncepcyjnych mogą być przydatne otwarte dane geoprzestrzenne. Analizując tego typu dane dla terytorium Polski, można zauważyć ich zróżnicowanie oraz mnogość. Są one udostępniane na bazie różnych regulacji krajowych czy też europejskich (jak np. dyrektywa INSPIRE) z wykorzystaniem różnych podejść oraz serwisów. Bardziej szczegółowo dane te zostały przedstawione w sekcji III.3.2.1.1. W przypadku braku danych o oczekiwanej jakości, możliwa jest potrzeba wygenerowania takich opracowań jak NMT czy NMPT na podstawie pomiaru terenowego.

W kolejnych etapach inwestycji, geodeta sporządza dokładny stan terenu poprzez stworzenie Mapy do Celów Projektowych (MDCP) na bazie istniejących zasobów (przede

wszystkim mapy zasadniczej) oraz pomiaru terenowego. MDCP zawiera informacje o szczegółach terenowych oraz rzeźbie terenu i służy jako baza do projektowania inwestycji. MDCP jest również podstawą do aktualizacji mapy zasadniczej (zatwierdzana jest przez Ośrodki Dokumentacji Geodezyjno-Kartograficznej).

Obecnie w Polsce główne zasoby składające się na treść mapy zasadniczej, takie jak EGiB, GESUT oraz BDOT500, są prowadzone w oparciu przede wszystkim o informacje dwuwymiarowe. Schemat poszczególnych składowych jest opisany z wykorzystaniem języka UML, natomiast formatem aplikacyjnym jest GML (odnoszący się do definicji zapisanych w UML oraz *.xsd*).

Po zaprojektowanie obiektu, kolejną fazą jest budowa (wznoszenie), podczas której zadania geodezyjne skupiają się przede wszystkim na geodezyjnym opracowaniu projektu np. w oparciu o projekt budowlany w formacie CAD (Computer Aided Design) lub dokumentacji w postaci PDF (Portable Document Format), a następnie wśród zadań do realizacji można wymienić stabilizację osnowy realizacyjnej i punktów odniesienia, tyczenie obiektu, obsługę montażu komponentów oraz bieżącą inwentaryzację (np. w przypadku robót zanikających). Ponadto dla niektórych typów obiektów prace mogą dotyczyć kontroli pionowości czy pomiarów odkształceń lub deformacji.

Kolejna faza dotyczy robót związanych z odbiorem obiektu oraz inwentaryzacji powykonawczej, co jest podstawą do aktualizacji zasobów (m.in. mapy zasadniczej) oraz uzyskania zgody na użytkowanie obiektu budowlanego.

W fazie eksploatacyjnej zadania są zależne od charakterystyki obiektu, w tym od miejsca jego lokalizacji. W przypadku np. położenia na terenach górniczych mogą być wymagane dodatkowe pomiary w celu monitorowania stanu obiektu.

Akwizycja danych pomiarowych czy realizacja działań wynikających z budowlanego procesu inwestycyjnego może być realizowana różnymi technikami pomiarowymi. Z punktu widzenia elektronicznych technik pomiarowych, które są wykorzystywane w ramach GOI, muszą one spełniać kryteria zdefiniowane w ramach PGiK wraz z aktami wykonawczymi (poszczególnymi rozporządzeniami). Niemniej jednak można stwierdzić, że dominującą rolę obecnie we wsparciu podstawowych zadań geodety pełnią tachimetry zrobotyzowane, niwelatory czy odbiorniki GPS (Global Positioning System) (Gillins i in., 2022). Ponadto w celu akwizycji bardziej gęstych oraz rozległych obszarowo danych wykorzystywane są skanery laserowe (np. dla celów zamodelowania informacji) (C. Wu i in., 2021) czy BSL (Bezzałogowe Statki Latające) z zamontowanym sensorem umożliwiającym wytwarzanie produktów fotogrametrycznych czy pozwalającym na uzyskanie chmury punktów również metodą skaningu laserowego (np. dla celów inwentaryzacji robót). Szczegółowo wykorzystanie BSL w branży AEC zostało opisane w (Nwaogu i in., 2023). Ponadto dla celów nieinwazyjnych pomiarów np. w przypadku potrzeby identyfikacji sieci uzbrojenia terenu (Gabryś & Ortyl, 2020) czy podłoża (Ortyl i in., 2021) możliwy jest pomiar z wykorzystaniem GPR (Ground Penetrating Radar).

III.2.1.3 Wpływ cyfryzacji i transformacji technologicznej na realizację zadań związanych z Geodezyjną Obsługą Inwestycji

Analogicznie do analizy branży budowlanej, cyfryzacja generuje zmiany także w zadaniach związanych z zarządzaniem cyfrowymi danymi geoprzestrzennymi jak

i realizowanych stricte podczas Geodezyjnej Obsługi Inwestycji. W poprzedniej sekcji zadania geodezyjne zostały opisane w ujęciu tradycyjnej realizacji prac. Niniejsza sekcja skupia się na zadaniach geodezyjnych w ujęciu transformacji cyfrowej oraz zmian wynikających z zastosowania technologii BIM oraz standardów otwartych.

Jednym z celów realizacji inwestycji z wykorzystaniem BIM oraz standardów otwartych jest bardziej wydajne zarządzanie informacją i danymi, w tym przede wszystkim, standaryzacja wymiany informacji, uniwersalna komunikacja oraz przechowywanie i operowanie danymi w formie cyfrowej, zapewniającej bezpośredni i łatwy dostęp. Takie podejście wymusza jednak istotne zmiany w zakresie realizacji zadań, na przykład w kontekście GOI. Celem tych działań jest również demokratyzacja danych, czyli umożliwienie dostępu i korzystania z informacji nie tylko przez specjalistów, ale także przez osoby spoza wąskich dziedzin wiedzy, na przykład w celu wizualizacji określonych problemów czy wsparcia procesów decyzyjnych. Taki model otwartego dostępu do danych sprzyja bardziej efektywnemu podejmowaniu decyzji oraz usprawnia współpracę i komunikację między różnymi interesariuszami procesu inwestycyjnego.

Wprowadzenie BIM wymusza ewolucję i wzajemne dostosowanie się obu domen: geoprzestrzennej oraz budowlanej. Dlatego też w niniejszej części zostały przedstawione i opisane nowe, bądź zmodyfikowane zadania geodezyjne wynikające z transformacji cyfrowej, zarówno od strony pomiarowej, możliwych do wykorzystania narzędzi jak i kwestii związanych z organizacją i działaniem operacyjnym (Tab. 3). Badania zostały wykonane na podstawie (Survey4BIM, 2015) oraz (Glinka i in., 2022a).

Ważnym elementem jest również rozwój umiejętności oraz kompetencji inżynierów, a także wprowadzanie zmian w sposób ewolucyjny w celu wdrażania nowych systemów czy realizacji zadań w nowy sposób w obszarze implementacji innowacyjnych narzędzi (Evans i in., 2023).

Tabela 3 Nowe bądź zmodyfikowane zadania oraz możliwe narzędzia/zasoby wspomagające inżyniera geodetę w ramach cyfryzacji procesów budowlanych i prowadzenia prac z wykorzystaniem BIM i standardów otwartych

Etap	Opis – nowe zadania	Realizacja zadania – przykładowe narzędzia/zasoby
Przygotowanie (Strategia)	Zaproponowanie „zaplecz” danych geoprzestrzennych niezbędnych do wykonania prac projektowych oraz koncepcyjnych (np. dla celów tworzenia EIR, części GeoEIR; wsparcie przy opracowywaniu map procesów i analizy przepływów informacji). Wybór układów odniesienia, punktów odniesienia dla całej inwestycji. Opis wymagań informacyjnych dla danych przestrzennych (np. wymóg co do stosowanego dla geodety MVD). Zaproponowanie mechanizmów weryfikujących dane. Dostarczenie danych oraz produktów (np. NMT) o zdefiniowanej rozdzielczości np. w oparciu o dane otwarte dla celów np. identyfikacji ryzyka. Wsparcie związane z przygotowaniem obszaru pod inwestycję np. aspekty związane z katastrum i podziałem czy rozgraniczeniem nieruchomości. Konwersja danych do standardu otwartego IFC lub innego zdefiniowanego formatu w ramach wymagań.	Lokalizacja projektu i analiza wymogów prawnych usytuowania projektu w przestrzeni globalnej – wiedza na temat stosowanych układów współrzędnych dla danej lokalizacji. Oprogramowanie do definicji wymagań informacyjnych. Otwarte dane przestrzenne, zasoby instytucji państwowych, a jeśli rozdzielczość/jakość danych jest niewystarczająca – wykonanie pomiaru z wykorzystaniem: <ul style="list-style-type: none"> • Bezzałogowego Statku Latającego (sensor optyczny lub skaner laserowy) – w efekcie: chmura punktów, ortofotomapa ze zdefiniowanym pikselem terenowym, NMPT, NMT; • Tachimetrów zrobotyzowanych; • Niwelatorów; • Odbiorników satelitarnych GPS; • Urządzeń do pomiaru elementów uzbrojenia terenu (infrastruktury podziemnej) np. GPR.
Koncepcja	Wykorzystanie danych z fazy Przygotowania, ich uszczegółowienie. Geodeta może zostać poproszony o wyjaśnienie nieścisłości w dotychczasowych danych: doprecyzowanie informacji geoprzestrzennej	Metody pomiarowe tak jak na etapie Przygotowania. Narzędzia do weryfikacji georeferencji oraz modelowania informacji przestrzennej/tworzenia dokumentacji.

	<p>czy przeprowadzenie analiz geoprzestrzennych (np. dla wsparcia analizy wariantów).</p> <p>Georeferencja plików i weryfikacja poprawności zapisu w przestrzeni globalnej, w szczególności dla IFC.</p> <p>Wizualizacja danych budowlanych w odniesieniu do danych geoprzestrzennych lub do ich części.</p> <p>Dostarczenie informacji, danych czy raportów w postaci zdefiniowanej w ramach wymagań np. w formie plików IFC.</p>	
Projektowanie	<p>Dostarczenie elementów takich jak Mapa do Celów Projektowych (w zdefiniowanej formie), Numeryczny Model Terenu, Numeryczny Model Pokrycia Terenu czy też trójwymiarowe modele (np. istniejące Sieci Uzbrojenia Terenu jako pliki IFC).</p> <p>Dostarczany produkt oraz jego charakterystyka powinna być określana w ramach opisu wymiany informacji pomiędzy interesariuszami.</p> <p>Geodeta sprawdza i potwierdza czy dany projekt jest możliwy do wyniesienia w teren (na podstawie otrzymanych danych).</p> <p>Analiza możliwych do wystąpienia kolizji z istniejącymi zasobami czy modelami informacyjnymi.</p> <p>Realizacja kolejnych zadań związanych z doszczegółowieniem danych geoprzestrzennych, informacji geoprzestrzennej.</p> <p>Współpraca przy tworzeniu modelu, jego komponentów, pod kątem umieszczenia w przestrzeni globalnej np. dostarczenie potrzebnych warstw dla celów kalkulacji robót ziemnych.</p> <p>Walidacja plików projektowych pod kątem poprawności zapisu georeferencji i wsparcie procesu koordynacji.</p> <p>Dostarczenie informacji, danych czy raportów w postaci zdefiniowanej w ramach wymagań np. w formie plików IFC.</p>	<p>Metody pomiarowe tak jak na etapie Przygotowania Narzędzia do weryfikacji georeferencji oraz modelowania informacji przestrzennej/tworzenia dokumentacji</p>
Wznoszenie (Budowa)	<p>Zaprojektowanie i wyniesienie w teren osnowy realizacyjnej powiązanej z układem globalnym oraz układem modelu. Projekt może powstać na bazie modelu IFC oraz harmonogramu.</p> <p>Czynności: tyczenia na podstawie modelu IFC, nadzór nad realizowanymi pracami i poprawnością geometryczną umieszczenia poszczególnych komponentów (analizy porównawcze zaprojektowano-wybudowano).</p> <p>Dostarczanie bieżących informacji na temat etapu realizacji fazy w celu: skonfrontowania harmonogramu czy kosztorysu, minimalizacji błędów czy poprawy bezpieczeństwa na placu budowy oraz odbioru poszczególnych robót.</p> <p>Bieżąca inwentaryzacja elementów robót zanikających.</p> <p>Zasilanie cyfrowego bliźniaka realizowanego obiektu.</p> <p>Dostarczanie i weryfikacja (np. odpowiednie odniesienie wysokościowe) modeli dla maszyn automatyzujących prace.</p> <p>Dostarczenie informacji, danych czy raportów w postaci zdefiniowanej w ramach wymagań np. w formie plików IFC.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tachimetry zrobotyzowane, niwelatory lub GPS – do prac związanych z tyczeniem – w zależności od wymaganej dokładności tyczenia obiektu • Skanowanie laserowe – do rejestrowania stanu obecnego/progressu • BSL z skanerem laserowy lub sensorem optycznym - do rejestrowania stanu obecnego prac/progressu • Skanery mobilne – do rejestrowania stanu obecnego prac/progressu • Zobrazowania satelitarne – do rejestrowania stanu obecnego prac/progressu • GPR – pomiar obiektów położonych pod powierzchnią <p>Narzędzia do weryfikacji georeferencji oraz modelowania informacji przestrzennej/tworzenia dokumentacji.</p> <p>Narzędzia do przeprowadzania analiz np. zaprojektowano-wybudowano (<i>as-planned vs as-built</i>) oraz oceny postępu prac budowlanych.</p>
Zakończenie robót/ oddanie obiektu do użytku	<p>Inwentaryzacja i stworzenie modelu powykonawczego (AIM) mogącego posłużyć do zarządzania zasobami w fazie operacyjnej na bazie AIR.</p> <p>Porównanie stanu bieżącego z projektowanym w celu zlokalizowania ewentualnych odstępstw od projektu.</p> <p>W przypadku obiektów narażonych na deformacje/przemieszczenia, stabilizacja trwałych punktów kontrolnych lub sensorów monitorujących stan techniczny obiektu.</p> <p>Stworzenie odpowiednich operatów powykonawczych oraz modelu powykonawczego.</p> <p>Dostarczenie informacji, danych czy raportów w postaci zdefiniowanej w ramach wymagań np. w formie plików IFC.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • BSL z skanerem laserowym lub sensorem optycznym • Skanery laserowe (TLS oraz mobilne) • Tachimetry zrobotyzowane i/lub GPS <p>Narzędzia do przeprowadzania analiz np. zaprojektowano-wybudowano (<i>as-planned vs as-built</i>)</p>
Konserwacja i utrzymanie	<p>W zależności od rodzaju obiektu, monitorowanie stanu technicznego obiektu poprzez pomiary okresowe.</p> <p>Tworzenie modeli stanu obecnego dla celów monitoringu stanu technicznego obiektu.</p>	<p>Narzędzia takie jak w fazie Wznoszenia. Dodatkowo możliwość monitorowania infrastruktury z wykorzystaniem zobrazowań satelitarnych (optycznych i radarowych) czy też specjalistycznych urządzeń (np. pomiar związane z infrastrukturą</p>

	Pomiar warunków geometrycznych obiektów (w zależności od rodzaju obiektu). Zapis danych w celach weryfikacyjnych np. do systemów zarządzania aktywami czy też zarządzania obiektem. Zasilanie informacji, w przypadku wykorzystania Cyfrowych Bliźniaków.	kolejową). Dane te powinny być zintegrowane z systemami zarządzania obiektem w celu np. identyfikacji obszarów wymagających działania (modernizacji/remontu).
Modernizacja	Stworzenie modelu stanu bieżącego i powtórna realizacja etapów 2 do 6 (w zależności od stopnia skomplikowania modernizacji). W przypadku braku informacji o stanie aktualnym, przeprowadzenie zadań związanych z inżynierią odwrotną.	Tak jak na etapie Przygotowania.
Rozbiórka	Stworzenie modelu stanu bieżącego. Przeprowadzenie analiz przestrzennych w celu odpowiedniej identyfikacji np. miejsc niebezpiecznych podczas prac rozbiórkowych	Tak jak na etapie Zakończenia robót/oddanie do użytku

III.2.2 Metody zapisu cyfrowych danych geoprzestrzennych

Metody zapisu cyfrowych danych geoprzestrzennych można podzielić na dwa podstawowe zbiory. Pierwszy zbiór to metody zapisu danych nieuwzględniające zapisu relacji pomiędzy obiektami. Są to przede wszystkim formaty bazujące na reprezentacji geometrycznej takie jak Shapefile czy GeoJSON. Drugi zbiór stanowią metody zapisu danych zawierające schematy i powiązania (relacje), a także semantykę. Takimi przykładami są CityGML czy GML. W przypadku wykorzystania baz danych, relacje również mogą być opisane, ale nie muszą, stąd można je potraktować jako rozwiązania hybrydowe. Docelowy sposób zapisu danych zależy od scenariusza użycia oraz docelowego zastosowania. Poniżej zostały opisane najczęściej stosowane metody zapisu danych dla cyfrowych danych geoprzestrzennych.

Shapefile to powszechnie stosowany format zapisu wektorowych danych geoprzestrzennych, opracowany przez firmę Esri, przeznaczony do zapisu danych wektorowych GIS. Format ten składa się z co najmniej trzech podstawowych plików: *.shp* (przechowującego geometrię), *.shx* (indeks geometrii) i *.dbf* (atrybuty), które wspólnie tworzą kompletny zestaw danych przestrzennych. Natomiast poprzez plik *.prj* definiowany jest układ współrzędnych. Shapefile jest formatem stosunkowo prostym i kompatybilnym z wieloma narzędziami GIS, chociaż ma pewne ograniczenia, takie jak brak obsługi topologii czy ograniczenia w zapisie atrybutów (maksymalna ilość znaków to 255).

GeoJSON to otwarty format zapisu danych geoprzestrzennych oparty na strukturze słownikowej JSON. Umożliwia przechowywanie zarówno geometrii, jak i związanych z nią atrybutów, co czyni go elastycznym narzędziem do wymiany i prezentacji danych przestrzennych w aplikacjach webowych i mobilnych. Ze względu na swoją prostotę, czytelność i kompatybilność z nowoczesnymi technologiami webowymi, jest szeroko stosowany w serwisach mapowych, wizualizacjach danych przestrzennych oraz w systemach GIS. Wraz z jego rozwojem możliwy jest również zapis geometrii trójwymiarowej.

CityGML (City Geography Markup Language) to otwarty standard oparty na XML, służący do modelowania i wymiany danych, przede wszystkim o miastach, w formacie 3D. Specyfikacja CityGML (semantyka) umożliwia reprezentację struktur miejskich na różnych poziomach szczegółowości (LOD), obejmujących budynki, infrastrukturę czy zagospodarowanie terenu (obiekty zielone). Wykorzystanie CityGML pozwala na kompleksową wymianę złożonych danych przestrzennych między różnymi systemami i organizacjami, co wspiera lepsze zarządzanie i planowanie w miastach.

Ponadto tworzone są różnego rodzaju rozszerzenia semantyki dla bardziej szczegółowego opisu obiektów rzeczywistych (ADE – Application Domain Extension)

CityJSON to format oparty na strukturze słownikowej (JSON), stworzony do przechowywania i wymiany danych przestrzennych 3D dotyczących miast, zgodnych z modelem CityGML. Upraszcza i kompresuje strukturę CityGML, co sprawia, że jest łatwiejszy w użyciu. Dzięki swojej strukturze, jest bardziej przystępny do odczytu i modyfikacji przez użytkowników, co ułatwia integrację z narzędziami do przetwarzania danych i aplikacjami webowymi. CityJSON stanowi efektywną alternatywę dla CityGML w kontekście zastosowań wymagających prostszej i bardziej kompaktowej reprezentacji danych przestrzennych.

LandXML to otwarty format oparty na XML, wykorzystywany do wymiany danych inżynierskich, geodezyjnych oraz związanych z zagospodarowaniem terenu. Jest używany do reprezentacji informacji o działkach, infrastrukturze, powierzchni terenu, punktach pomiarowych oraz innych elementach przestrzennych.

WKT (Well-known text), nie jest to format pliku, ale znacznikowy język wykorzystywany do zapisu geometrii (danych wektorowych) oraz informacji o niej np. stosowanych układów współrzędnych. W przypadku opisu geometrii, zawiera w sobie informacje o reprezentacji poprzez definicję rodzaju np. *Point*, *Polygon*, *MultiPolygon Z*, *PolyhedralSurface Z* itd. a następnie, w postaci listy lub zestawu list, definicje kolejnych wierzchołków dla poszczególnych składowych elementów. Istnieje również wersja binarna (WKB – Well-known binary) dla celów bezpośredniego odczytu dla maszyn.

PostGIS to rozszerzenie do systemu zarządzania bazami danych PostgreSQL, które dodaje wsparcie dla danych geoprzestrzennych zgodnych ze standardem SQL/MM Spatial. Umożliwia przechowywanie, zapytania oraz analizę danych geoprzestrzennych, integrując zaawansowane funkcje GIS bezpośrednio w relacyjnej bazie danych. Dzięki możliwościom takim jak indeksowanie przestrzenne, obsługa różnych typów geometrii oraz operacji przestrzennych, stanowi narzędzie wspierające dla zastosowań wymagających wydajnego zarządzania dużymi zestawami danych geoprzestrzennych. Ponadto poprzez możliwość zastosowania rozszerzenia takiego jak SFCGAL istnieje możliwość zapisu i analiz danych reprezentowanych przez geometrię trójwymiarową.

Ponadto istnieją domenowe schematy zapisu danych oparte na GML (Geography Markup Language), zawierające nierzadko wymaganą strukturę opisaną np. przez akty prawne w postaci schematu UML czy w formie plików *.xsd*. Tegu typu schematy dotyczą najczęściej informacji pochodzących z krajowych zasobów jak np. GESUT (Geodezyjna Ewidencja Sieci Uzbrojenia Terenu) czy EGiB (Ewidencja Gruntów i Budynków).

Oprócz powyżej opisanych, należy również wyróżnić inne jak KML (Keyhole Markup Language) dla celów zapisu reprezentacji wektorowych, GeoTiff dla danych rastrowych, Spatialite jako alternatywa dla rozwiązania bazodanowego PostGIS (rozszerzenia bazy danych SQLite) czy też dla chmur punktów formaty LAS/LAZ czy e57.

III.3 Cyfrowe dane budowlane oraz cyfrowe dane geoprzestrzenne

III.3.1 Interoperacyjność domeny budowlanej oraz geoprzestrzennej

Interoperacyjność cyfrowych danych budowlanych i geoprzestrzennych (często przedstawiane jako integracja lub łączenie danych BIM i GIS) może odbywać się na różnych poziomach. Norma ISO 11354-1 (ISO 11354-1:2011 - Advanced automation technologies and their applications — Requirements for establishing manufacturing enterprise process interoperability — Part 1: Framework for enterprise interoperability, 2011) wyróżnia 4 podstawowe poziomy interoperacyjności: biznesową, procesu, usługi (aplikacji) oraz danych. W literaturze, częściej spotykany podział stricte integracji jest dokonywany na poziom usługi, procesu oraz danych.

Interoperacyjność na poziomie biznesowym definiuje aspekty dotyczące zdolności organizacji (przedsiębiorstw) do współpracy z innymi podmiotami. Zagadnienie to nie będzie analizowany w ramach niniejszej pracy, ponieważ dotyczy innego zakresu.

Interoperacyjność na poziomie procesu odnosi się do zdolności podmiotów biznesowych do wymiany informacji i innych elementów potrzebnych do działania procesu. W przypadku procesu budowlanego, będzie to zdolność organizacji (podmiotów) do wymiany cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych.

Interoperacyjność na poziomie danych odnosi się do określeń, definicji i rozumienia wymiany informacji oraz tego, w jaki sposób czynniki te wpływają na możliwość wymiany informacji między domenami. Są to także kwestie związane z wykorzystaniem rozwiązań informatycznych do wymiany informacji pomiędzy domenami.

Interoperacyjność na poziomie usługi (aplikacji) odnosi się do określeń, definicji i rozumienia wymiany informacji oraz tego, w jaki sposób czynniki te wpływają na możliwość zapytania, dostarczenia oraz wykorzystania usługi.

Kolejnym aspektem, według którego może następować podział rozwiązań jest podejście do interoperacyjności. Standard ISO 11354-1 (ISO 11354-1:2011 - Advanced automation technologies and their applications — Requirements for establishing manufacturing enterprise process interoperability — Part 1: Framework for enterprise interoperability, 2011) wyróżnia 3 podstawowe podejścia: zintegrowane, unifikacja oraz federacja. Integracja polega na konwersji modeli domenowych do innych modeli informacyjnych np. dane geoprzestrzenne są konwertowane do formatu IFC. Można więc stwierdzić, że są to wszelkiego rodzaju rozwiązania ETL (Extract Translate Load) Unifikacja uogólnia proces i polega na wykorzystaniu meta-modelu w celu łączenia danych (Clemen, 2022). Federacja jest natomiast najtrudniejszym z podejść, gdyż nie przekształca danych (dane są przetrzymywane w charakterystycznych dla nich modelach informacyjnych), natomiast ich łączenie następuje poprzez możliwość tworzenia zapytań poprzez usługi: przez każdego, w dowolnym miejscu i czasie. Przykładem takiego podejścia są rozwiązania oparte o ontologie danych wykorzystujące modele typu OWL (Web Ontology Language).

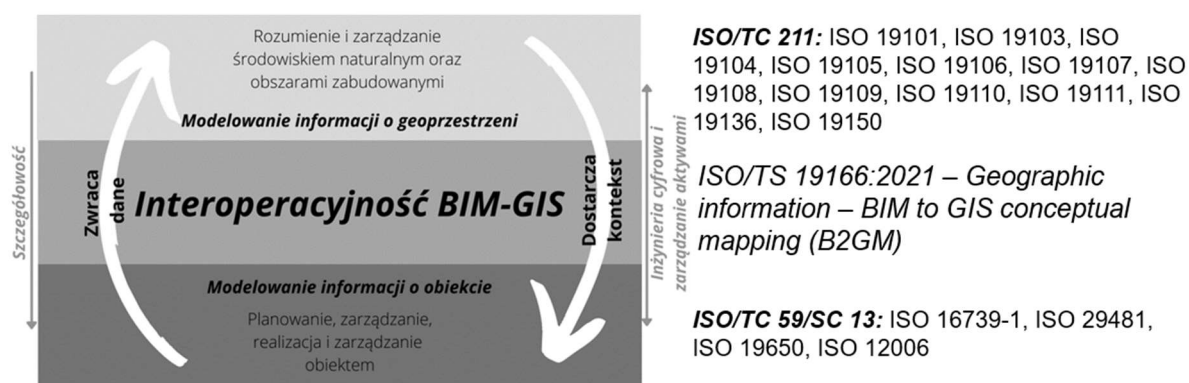
W 2021 roku został również opublikowany raport techniczny przez wspólną grupę roboczą ISO Joint Working Group 14 (ISO/TR 23262:2021 GIS (geospatial) / BIM interoperability, 2021) odpowiedzialną za interoperacyjność BIM oraz domeny geoprzestrzennej (GIS). Raport przedstawia analizę interoperacyjności pomiędzy domeną

geoprzestrzenną, a budowlaną, możliwości aplikacji, główne idee, które kryją się za łączeniem danych z tych dwóch obszarów, a także bariery interoperacyjności. Głównym zamysłem jaki stoi za interoperacyjnością jest budowa wspólnych systemów (ISO/TR 23262:2021 GIS (geospatial) / BIM interoperability, 2021) (Rys. 16).



JWG 14: ISO/TC 59/SC 13 i ISO/TC 211 – BIM and GIS interoperability

ISO/TR 23262:2021 – GIS
(geospatial) / BIM interoperability



Rysunek 16 Interoperacyjność domeny geoprzestrzennej (GIS) oraz budowlanej (BIM) wraz z stosowanymi standardami oraz ogólną ideą wymiany informacji

Wśród barier interoperacyjności wskazano trzy kryteria: organizacyjne, technologiczne oraz koncepcyjne. Poniżej została opisana każda z barier (ISO/TR 23262:2021 GIS (geospatial) / BIM interoperability, 2021).

Bariera organizacyjna wynika z kwestii dotyczących struktur organizacji, niedostosowanych systemów informatycznych czy też braków kompetencyjnych wynikających z różnych czynników jak np. dojrzałość organizacji czy poziom cyfryzacji.

Wśród barier koncepcyjnych zidentyfikowano przede wszystkim kwestie związane z różnymi koncepcjami dotyczącymi reprezentacji obiektów (brak kompatybilności w geometrii, składni, semantyce oraz semiotyce), a także różnice w wyrażaniu, definicji oraz zrozumieniu wymienianych danych na różnych poziomach abstrakcji. Przykładem takiej bariery mogą być różnice w architekturze schematów danych w obu technologiach czy też różny sposób opisywania poziomów szczegółowości.

Barierę technologiczną dotyczą przede wszystkim kwestii różnic w zakresie danych oraz stosowanych standardach zapisu i wymiany informacji pomiędzy systemami, a także niekompatybilnych interfejsach, protokołach wymiany danych, serwisach czy różnicach w przechowywaniu danych. Przykładem takiej bariery jest reprezentacja geometryczna, która w BIM przekazywana jest najczęściej w sposób parametryczny (zagnieżdżony), natomiast w domenie geoprzestrzennej w sposób jawny. Innym przykładem jest podejście do georeferencji czy też metadanych.

Z drugiej strony w ramach raportu zostały zidentyfikowane szanse związane z wymianą informacji pomiędzy domenami, a także propozycją przyszłych prac (w tym potrzeba budowy narzędzi wspierających wymianę informacji pomiędzy domenami). Szanse te

dotyczą: łączenia koncepcji abstrakcyjnych, tworzenia słowników dla celów wyeliminowania konfliktów pomiędzy definicjami w obu domenach, georeferencji modeli BIM, wytwarzaniu wymagań informacyjnych geoEIR dla celów wspomagania scenariuszy użycia, wytworzenia procedur przekształcania danych (np. bezstratna konwersja), ujednoczenie kwestii związanych z metadanymi, kontrola jakości wymiany informacji, CDE API (openCDE Application Programming Interface) dla danych geoprzestrzennych czy też wypracowanie serwisów dla mapowania (OGC API dla BIM).

Każdy z tych elementów stanowi obecnie problem w interoperacyjności pomiędzy tymi domenami oraz stanowi barierę w integracji cyfrowych danych budowlanych oraz cyfrowych danych geoprzestrzennych. Opracowane i implementowane w niniejszej pracy algorytmy oraz cyfrowe narzędzia wspierające mogą stanowić elementy, które będą mostem umożliwiającym przeprowadzanie procesów integracji danych budowlanych oraz geoprzestrzennych.

W ramach prac standaryzacyjnych powstał również koncepcyjny opis ram prac (*ang. framework*) dla celów mapowania informacji z BIM do GIS wraz z uwzględnieniem wymaganych mechanizmów mapowania - DS/ISO/TS 19166:2021 – *Geographic Information – BIM to GIS conceptual mapping (B2GM)*.

Zidentyfikowano trzy poziomy mapowania BIM do GIS oraz przedstawiono koncepcję mechanizmów (ISO/TS 19166:2021 Geographic information — BIM to GIS conceptual mapping (B2GM), 2021):

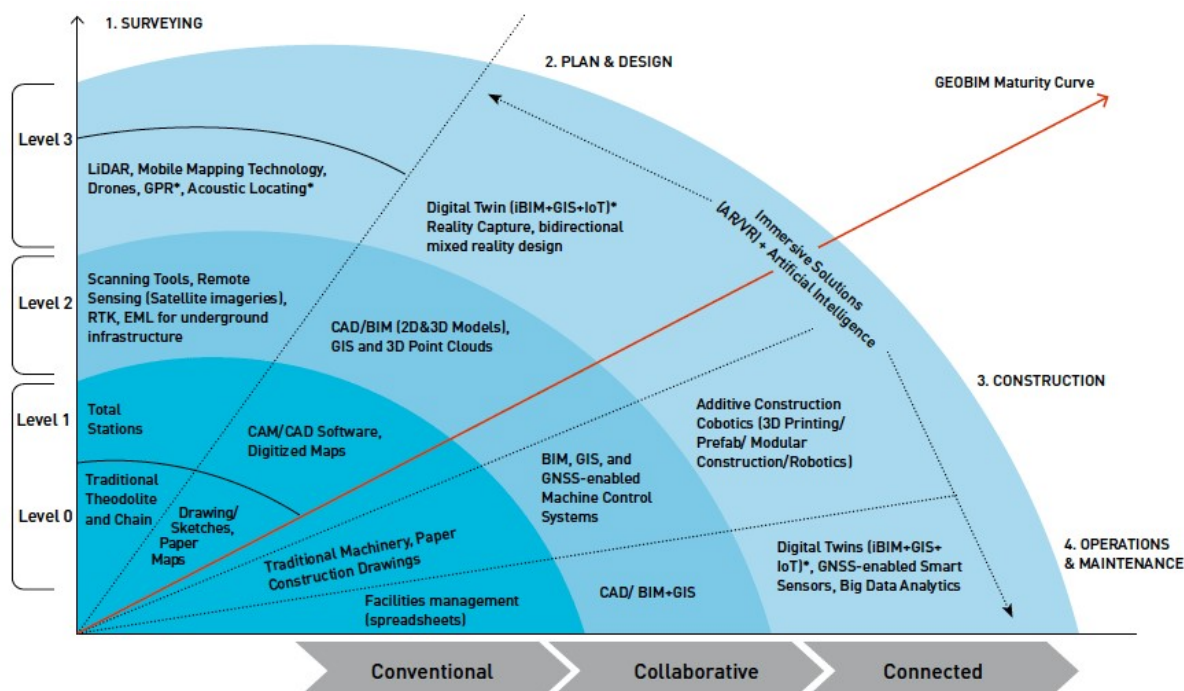
- Zależny od scenariusza użycia. Mapowanie, konwersja czy też łączenie danych BIM oraz GIS zależne jest od celu. Warunkuje to docelowy układ wyjściowy danych czy ich poziom szczegółowości. Ponadto możliwe jest wystąpienie dodatkowych danych suplementarnych wspierających dany przykład zastosowania.
- Mapowanie elementów pomiędzy domenami np. schematami danych wraz z opisem zasad dotyczących transformacji modeli BIM do domeny geoprzestrzennej
- Mapowanie poziomów szczegółowości (LOD). Istnieją różnice pomiędzy definicją LOD w obu domenach. Mapowanie na tym poziomie dotyczy możliwości ekstrakcji informacji z modeli BIM na określonym poziomie szczegółowości, dostosowanym do określonego przypadku użycia bądź przykładu zastosowania w domenie geoprzestrzennej.

Powyżej opisane mechanizmy mogą zostać wykorzystane podczas transformacji danych BIM do GIS. Rozwiązanie jednak jest opisane na poziomie abstrakcyjnym, bez szczegółowej implementacji. Dalsze rozwiązania standaryzacyjne są potrzebne w celu uzyskania dwukierunkowego połączenia danych pomiędzy domenami oraz wypracowanie standardów na poziomie implementacyjnym. Opracowane w ramach niniejszej pracy cyfrowe narzędzia wspierające mogą się również przyczynić do zrobienia kroku naprzód w celu standaryzacji w obszarze narzędzi.

Prace standaryzacyjne są prowadzone głównie w ramach komitetów standaryzujących ISO, ale kierowane są przez organizacje standaryzujące prace w obu domenach, rozpatrując standardy otwarte. Odpowiednio będą to dla BIM – buildingSMART oraz GIS – Open Geospatial Consortium. Oprócz stricte raportów technicznych czy specyfikacji tworzone są również dokumenty analizujące różne kwestie. Takim przykładem może być (Gilbert i in.,

2020), gdzie przeanalizowano trzy formaty danych: CityGML, IFC oraz LandInfra pod kątem wymiany informacji pomiędzy domenami.

Kolejny aspekt dotyczy poziomów dojrzałości poszczególnych rozwiązań integrujących cyfrowe dane budowlane oraz geoprzestrzenne. W ramach raportu *GEOBIM Market in AEC Industry* (Geospatial Media, 2023) dotyczącego postępu oraz stanu wdrożeń rozwiązań integrujących cyfrowe dane budowlane oraz geoprzestrzenne został opisany model poziomów dojrzałości GeoBIM. Zostały wyodrębnione 4 poziomy (od 0 do 3), opisujące technologie oraz rozwiązania, które mogą być wykorzystane w różnych fazach cyklu życia obiektu. Rozpoczynając od analogowych rozwiązań pomiarowych bez wsparcia lub z ograniczonym wsparciem systemów cyfrowych (np. CAD) (poziom 0 oraz 1 – konwencjonalny), przez model współpracy wykorzystujący szeroko nowe technologie pomiarowe, przechowywania danych oraz zarządzania nimi oraz BIM (poziom 2), aż po systemy w pełni lub półautomatyczne oparte na sztucznej inteligencji i sensorach (poziom 3 – połączone środowisko). Poniżej został zaprezentowany omawiany schemat (Rys. 17).



Rysunek 17 Model poziomów dojrzałości GeoBIM (łączenia cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych) (Geospatial Media, 2023)

Rozpatrując kwestie wprost związane z geodezyjnymi danymi pomiarowymi czy produktami na ich bazie powstającymi, nie zidentyfikowano opracowań standaryzujących kwestie ich interakcji z systemami budowlanymi takimi jak BIM.

Zbierając niejako w całość i podsumowując, domena geoprzestrzenna w ujęciu cyfrowych danych geoprzestrzennych jest skupiona na modelowaniu informacji o mniejszej szczegółowości i większym zasięgu terytorialnym (w szczególności GIS). Z drugiej strony BIM skupia się na modelowaniu informacji o pojedynczym obiekcie, a nawet elemencie tego obiektu, w zależności od zdefiniowanego poziomu szczegółowości.

Poniżej zostały przedstawione podstawowe różnice pomiędzy tymi domenami z rozbiem cyfrowych danych geoprzestrzennych na systemy GIS oraz na dane geodezyjne i pomiarowe (Tab. 4).

Tabela 4 Charakterystyka oraz różnice pomiędzy cyfrowymi danymi budowlanymi oraz geoprzestrzennymi

Kryterium	Cyfrowe dane budowlane (BIM)	Cyfrowe dane geoprzestrzenne (GIS, geodezja, dane pomiarowe)	
		GIS	Dane pomiarowe, geodezja
<i>Zastosowanie</i>	zarządzanie informacją podczas cyklu życia obiektu – model 3D i metadane	wprowadzanie, przechowywanie, analizowanie, udostępnianie danych geoprzestrzennych	dostarczanie produktów dla celów podejmowania decyzji, wykonywanie zadań wynikających z procesu budowlanego
<i>Szczegółowość</i>	pojedynczy komponent	poziom obiektu	pojedynczy komponent jak i poziom obiektu
<i>Pojemność informacji</i>	obiekt i pojedyncza informacja z otoczenia	otoczenie obiektu z pojedynczymi informacjami na temat szczegółów obiektu	obiekt oraz otoczenie obiektu
<i>Standardy</i>	IFC, ISO-19650, ISO-16739	CityGML, WMS, WFC, WCS, LandXML, ISO 191XX	standardy dotyczące wykonywania pomiarów, akty prawne regulujące metody prowadzenia prac geodezyjnych np. PGiK czy standardy wymiany informacji
<i>Umiejscowienie w przestrzeni</i>	lokalne (globalne)	globalne	globalne
<i>Reprezentacja geometryczna 3D</i>	CSG, Swept Solid, B-Rep	B-Rep	chmury punktów, modele TIN, modele wektorowe, reprezentacje 2.5D

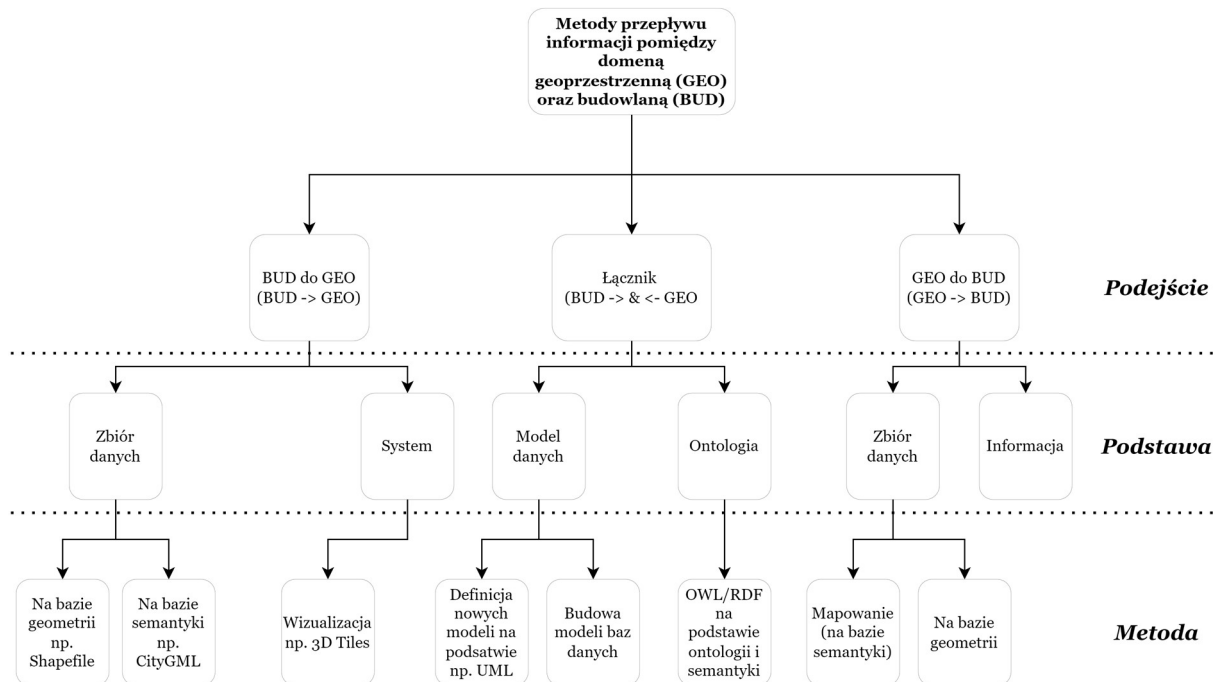
III.3.2 Integracja cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych

III.3.2.1 Metody realizacji procesów łączenia i konwersji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych

Rozpatrując trzy główne idee związane z podejściami do integracji danych BIM oraz GIS można wyróżnić następujące poziomy: danych, aplikacji oraz procesu (Amirebrahimi i in., 2015). Poziom danych to wszelkiego rodzaju rozwiązania, podczas których struktury danych są modyfikowane poprzez ich rozszerzenie czy też konwersję pomiędzy technologiami w celu zapewnienia obsługi zdefiniowanego zastosowania (Zhu i in., 2018). Poziom procesu to wszelkiego rodzaju operacje łączenia, które nie zmieniają struktur danych oraz formatów w obu technologiach, a łączenie danych odbywa się poprzez m.in. ontologie czy też serwisy (przepływ prac) (Sani & Abdul Rahman, 2018). Natomiast na poziomie aplikacji struktury danych nie są modyfikowane oraz nie tworzony jest żaden serwis czy odniesienia ontologiczne. Realizacja procesu integracji danych dostosowane jest do zdefiniowanego scenariusza użycia np. poprzez rozszerzenie istniejącego oprogramowania z wykorzystaniem narzędzi typu wtyczka (*plug-in*) (X. Liu i in., 2017).

Również na bazie przepływu informacji może być rozpatrywane łączenie domen budowlanej oraz geoprzestrzennej i ich interoperacyjność. W (Zhu & Wu, 2022) szczegółowo został przeanalizowany aspekt przepływu informacji w ramach systemów BIM i GIS. Poniżej

została rozszerzona ta analiza w zakresie wykorzystania geodezyjnych danych pomiarowych oraz innych zidentyfikowanych podstaw przepływu informacji (Rys. 18) dla celów integracji cyfrowych danych budowlanych i geoprzestrzennych.



Rysunek 18 Przepływ informacji pomiędzy domenami geoprzestrzenną oraz budowlaną na poziomie technologicznym (opracowanie własne na podstawie (Zhu & Wu, 2022))

Zidentyfikowano trzy podejścia do przepływu informacji: poprzez konwersję cyfrowych danych budowlanych do danych geoprzestrzennych (BUD → GEO), poprzez stosowanie łącznika np. ujednocniającego struktury danych (BUD → & ← GEO) oraz przez konwersję danych geoprzestrzennych do danych budowlanych (GEO → BUD).

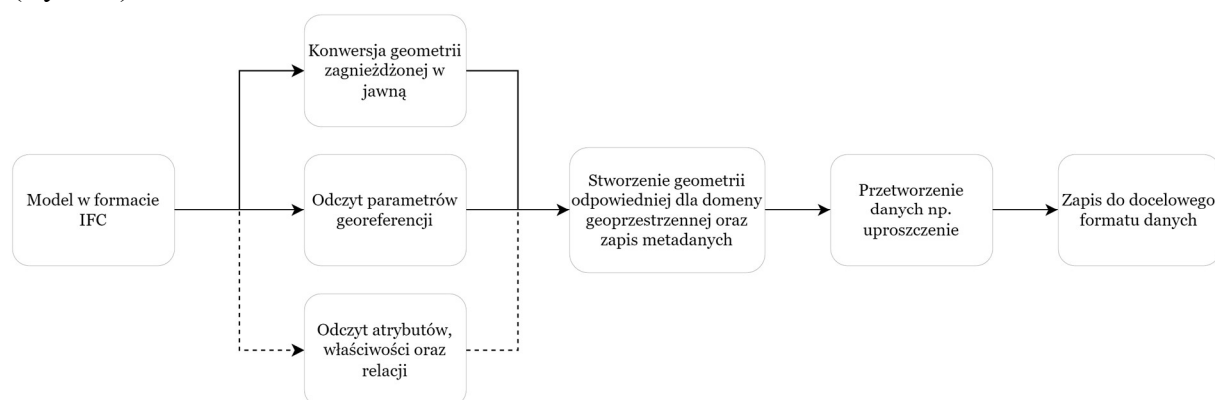
A. BUD → GEO

Rozpatrując przepływ informacji BUD → GEO zidentyfikowano dwie podstawy: zbiór danych oraz system. Rozwiązania oparte o zbiór danych dotyczą przede wszystkim łączenia czy też konwersji danych pomiędzy technologiami na bazie geometrii czy semantyki.

W literaturze istnieje niemała liczba publikacji dotyczących tego zakresu łączenia danych. Metody bazujące na geometrii dotyczą przede wszystkim procesu georeferencji oraz ekstrakcji informacji geometrycznych z modeli BIM (w formacie IFC) bez lub z ograniczoną informacją dotyczącą: atrybutów oraz relacji pomiędzy obiektami. Docelowymi formatami danych mogą być np. ESRI Shapefile (Glinka i in., 2024; Zhu, Wang, Chen, i in., 2019) czy GeoJSON (Hobeika i in., 2022). Oprócz informacji geometrycznej dołączane mogą być również informacje alfanumeryczne. Rozwiązania te są więc traktowane jako elastyczne (Zhu & Wu, 2021b). Jednakże z drugiej strony mają wiele barier jak na przykład ograniczenia w definiowaniu relacji pomiędzy obiektami (Zhu & Wu, 2022), budowa topologii (Zhu & Wu, 2021b) czy ograniczenia pojemności informacyjnej np. maksymalna ilość znaków (Glinka i in., 2024). Patrząc przez pryzmat samej informacji geometrycznej możliwe jest przechowywanie złożonych i skomplikowanych struktur geometrycznych (Zhu, Wang, Chen, i in., 2019), również trójwymiarowych, jednak z uwzględnieniem odpowiedniej generalizacji. Kwestie te dotyczą przede wszystkim

trójwymiarowych obiektów zawierających łuki, które podczas opisu w formie jawnej muszą podlegać pewnym generalizacją.

Poniżej na rysunku przedstawiono schematyczną koncepcję stojącą za tego typu podejściem (Rys. 19).



Rysunek 19 Konwersja BUD → GEO do formatów bazujących na geometrii danych

Metody bazujące na semantyce to rozwiązania, które pozwalają na zmapowanie struktur danych w obu technologiach, czyli odnalezienie odpowiednich klas sobie odpowiadających (lub zbliżonych) w zdefiniowanych schematach. Wśród tego typu rozwiązań należy wyróżnić przede wszystkim konwersję formatu IFC do CityGML (Tan i in., 2023), CityJSON (Şenol & Gökgöz, 2024) oraz innych formatów bazujących na GML (np. LandGML/LandXML (Kumar i in., 2019)). Głównym problemem jest poziom granulacji klas pomiędzy technologiami, który w BIM jest zdecydowanie wyższy (więcej instancji klas umożliwiających szczegółowy opis rzeczywistych obiektów) niż w domenie geoprzestrzennej. W związku z tym, proponowane są rozwiązania rozszerzające struktury danych po stronie cyfrowych danych geoprzestrzennych. Przykładem takiego rozwiązania jest ADE (Application Domain Extension) dla formatu CityGML umożliwiające wzbogacanie modelu danych o nowe klasy i atrybuty, przy jednoczesnym zachowaniu pierwotnej struktury semantycznej (Biljecki i in., 2018). Oczywiście poza kwestią mapowania klas pomiędzy strukturami schematów danych, należy również pamiętać o kwestii geometrii oraz poziomów szczegółowości, które najczęściej są zdefiniowane właśnie, pośrednio, w schematach danych poszczególnych formatów.

Z drugiej strony, istnieją rozwiązania oparte o podejście systemowe, w których wykorzystywane są rozwiązania nie łączące wprost danych, ale umożliwiające np. ich wspólną wizualizację z wykorzystaniem formatów takich jak 3DTiles (Y. Liu i in., 2023; Xu i in., 2020). Rozwiązania te najczęściej są tworzone na zasadach aplikacji internetowych (*ang. web-based*). Szczegółowo ten zakres zostało omówiony w publikacji przeglądowej (Shkundalov & Vilitienė, 2021).

B. BUD → & ← GEO

Kolejnym podejściem jest wykorzystanie rozwiązania typu „łącznik” (nazwanego tak na potrzeby niniejszej pracy): BUD → & ← GEO. Rozwiązania te podzielono ze względu na: definicję modeli danych oraz na te, które bazują na ontologii schematów danych.

Poprzez modele danych rozumie się tworzenie nowych struktur danych:

- na bazie metamodeli np. modelowania z wykorzystaniem UML, które dają możliwość wykorzystania określonej informacji z obu domen,

- wykorzystania baz danych do złączenia modeli danych i wspólnego przetwarzania.

Tego typu łączenie danych, w szczególności bazujące na metamodelach jest skierowane na zdefiniowane zastosowanie. Przykładowo (Amirebrahimi i in., 2016) zaproponowano model danych dostosowany do potencjalnej oceny skutków powodzi z wykorzystaniem UML oraz GML. Innym przykładem jest (Isikdag i in., 2013), gdzie opracowano model danych łączący domenę budowlaną oraz geoprzestrzenną dla celów nawigacji wewnątrz obiektów.

Wykorzystanie baz danych natomiast również umożliwia definiowanie nowych modeli danych. Informacja może być łączona np. poprzez relacje pomiędzy tabelami z wykorzystaniem języka SQL. Tego typu rozwiązanie zostało opisane w (Wyszomirski & Gotlib, 2020), gdzie stworzono model danych umożliwiający dwukierunkową konwersję pomiędzy IFC a CityGML na bazie bazy danych PostgreSQL. Ponadto w (Glinka i in., 2024) zaproponowano przekształcenie pliku IFC do bazy danych relacyjno-obiektowej wraz z odniesieniem do struktur geoprzestrzennych.

Rozwiązania bazujące na ontologii stanowią stosunkowo dużą reprezentację rozwiązań spotykanych w literaturze. Jak opisano w (Zhu & Wu, 2022) w podejściu opartym na ontologii etapy są następujące: identyfikacja pojęć w BIM i GIS, a także opis ich relacji, oraz ustanowienie ontologii dla tych dwóch obszarów; identyfikacja wspólnych pojęć między nimi i scalanie ontologii; tworzenie złożonej ontologii przy użyciu języków umożliwiających opis ontologii np. RDF (Resource Description Framework) czy OWL (Web Ontology Language); stworzenie wspólnej reprezentacji danych np. przy użyciu trójek (*triples*). Implementacja tego typu rozwiązań oparta jest nierzadko o grafowe bazy danych (Malinverni i in., 2022). Budowa zapytań do wytwarzanych grafów często bazuje natomiast na SPARQL (Karan i in., 2016). Przykładowe rozwiązanie bazujące na tego typu podejściu zostało opisane w (Zhu i in., 2022), jednak bez uwzględniania informacji geometrycznej. Możliwe jest również wykorzystanie standardu GeoSPARQL do łączenia cyfrowych danych geoprzestrzennych z budowlanymi na tym poziomie (McGlenn i in., 2021).

C. GEO → BUD

Ostatnim z zidentyfikowanych podejść jest transformacja danych geoprzestrzennych do cyfrowych danych budowlanych. Zakres cyfrowych danych geoprzestrzennych, tak jak opisywano w poprzednich sekcjach, jest szeroki. Dlatego też to podejście podzielono ze względu na dwie podstawy.

Pierwsza dotyczy przede wszystkim konwersji danych geoprzestrzennych do cyfrowych danych budowlanych (najczęściej formatu IFC). Rozwiązań tych w literaturze jest zdecydowanie mniej niż BUD → GEO, jednakże bazują na podobnych metodach (na bazie geometrii oraz semantyki). Wśród metod bazujących na geometrii można przede wszystkim wyróżnić podejścia związane z scan2BIM, gdzie na bazie chmury punktów ze skaningu laserowego lub pozyskanej metodami fotogrametrycznymi wykonuje się model BIM metodami automatycznymi, bądź ręcznymi (Massimiliano i in., 2021; Sofia i in., 2020). Innym przykładem jest zamodelowanie sieci uzbrojenia terenu do formatu IFC na podstawie historycznych danych pomiarowych dla celów budowy systemów zarządzania (M. Wang i in., 2019). Metody pozyskiwania informacji mogą być różne i nierzadko bazują one również

na metodach Uczenia Maszynowego np. dla celów śledzenie postępu prac budowlanych (Patel i in., 2021).

Inną bazą jest semantyka, czyli najczęściej konwersja plików opartych o GML (np. CityGML) do formatu IFC (Borrmann, 2010; Chognard i in., 2018).

Druga podstawa dotyczy wykorzystania zidentyfikowanej informacji na bazie np. danych pomiarowych oraz przesłanie jej do domeny budowlanej. Informacja ta może być zróżnicowana i dotyczyć np. ilości pozostałych materiałów sypkich czy wsparcia działań logistycznych np. łańcuchów dostaw.

Patrząc z perspektywy pierwszego z podziałów (na poziomy danych, procesu oraz aplikacji) przedstawiona powyżej klasyfikacja poszczególnych podejść do łączenia danych dotyczy przede wszystkim poziomu danych oraz procesu. Integracja na poziomie aplikacji najczęściej jest wykonywana przez specjalistyczne oprogramowanie lub algorytmy i ich rozszerzenia umożliwiające: po stronie geoprzestrzennej analizowanie zdefiniowanych cyfrowych danych budowlanych (Deng i in., 2016) lub w ramach oprogramowania z domeny budowlanej analizowanie cyfrowych danych geoprzestrzennych, a także poprzez ekstrakcję określonych informacji z obu domen w celu analizy (Deng i in., 2019) lub wsparcia procesu decyzyjnego (Tan i in., 2018). W literaturze spotykany jest również podział ze względu na istotność poszczególnych domen. (H. Wang i in., 2019) proponują wyodrębnienie trzech trybów integracji BIM i GIS: BIM jako lider oraz GIS jako system wspierający, GIS jako lider oraz BIM jako system wspierający, a także zintegrowane podejście równorzędne. Podział ten jest zależny od realizowanego scenariusza użycia.

Podsumowując niejako niniejszą część, rozwiązania opisywane w literaturze skupiają się najczęściej na pojedynczych problemach łączenia cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych. Brak jest uniwersalnych, holistycznych ram prac (*framework*), które z wykorzystaniem standardów otwartych opisywałyby i umożliwiały przeprowadzanie procesów integracji i łączenia. W literaturze jako główne bariery integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych identyfikowane są:

- problematyka georeferencji w BIM (w formacie IFC),
- różnice w stosowanych pojęciach oraz ich znaczeniu, definicji modeli danych oraz ich schematów np. różnice w definicji poziomów szczegółowości,
- złożoność danych (w szczególności schemat IFC),
- braki i różnice w definiowaniu wymagań informacyjnych,
- problemy z reprezentacją geometryczną i jej szczegółowością (konwersja z jawnej w zagnieżdżoną lub odwrotnie); mogące wystąpić błędy topologiczne,
- brak standardów i dobrych praktyk,
- ograniczone wsparcie przez oprogramowanie, nierzadko zawierające błędy (utrata/przekłamanie informacji),
- implementacja algorytmów na niskim poziomie gotowości technologicznej oraz problemy w skalowaniu rozwiązań.

III.3.2.2 Georeferencja danych

Z punktu widzenia poprawności realizacji procesu inwestycyjnego oraz procesów związanych z integracją cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych kluczowym parametrem determinującym możliwość integracji jest odpowiednie umiejscowienie danych

w geoprzestrzeni. Poprzez odpowiednie umieszczenie w geoprzestrzeni rozumiany jest opis przyjętych układów współrzędnych oraz odniesień przestrzennych. Dotyczy to zarówno układu współrzędnego horyzontalnego jak i wysokościowego.

Dane geoprzestrzenne właściwie z definicji podlegają georeferencji co wynika ze stosowanych standardów określających te dane (ISO 19111 (ISO 19111:2019 - Geographic information — Referencing by coordinates, 2019)). Dlatego też poniżej przeanalizowano georeferencję z punktu widzenia przede wszystkim cyfrowych danych budowlanych w postaci formatu IFC.

Z punktu widzenia cyfrowych danych budowlanych, precyzja georeferencji jest w głównej mierze zależna od potrzeby, która powinna być zdefiniowana w wymaganiach informacyjnych dotyczących procesu wymiany informacji (Noardo, Oho, i in., 2021). W samej strukturze schematu IFC, metoda georeferencji jest również uwarunkowana pojemnością informacyjną w zależności od stosowanej wersji. W wersji IFC 2x3, brak jest klas umożliwiających wprost nazwanie stosowanych układów współrzędnych. Proponowane są metody dodające te informacje poprzez definicję odpowiednich zestawów właściwości (buildingSMART Australia, 2020). W kolejnych wersjach rozszerzono jednak schemat o klasy umożliwiające definicję georeferencji. (Christian & Hendrik, 2019) przedstawia poziomy georeferencji (LoGeoRef) dla IFC w wersji IFC4. Zidentyfikowano tam, że dla celów automatyzacji łączenia danych budowlanych oraz cyfrowych, jedynym użytecznym poziomem jest najwyższy poziom georeferencji. Odnosi się on do wykorzystania zaimplementowanych klas *IfcMapConversion* oraz *IfcProjectedCRS* w celu pełnego zdefiniowania globalnego układu współrzędnych. Klasa *IfcMapConversion* służy stworzeniu relacji pomiędzy lokalnym (projektowym) układem współrzędnych zdefiniowanym poprzez *IfcGeometricRepresentationContext*, a globalnym układem współrzędnych poprzez podanie atrybuty translacji (*Easting*, *Northings*, *OrthogonalHeight*), obrotów (*XaxisAbcissa*, *XaxisOrdinate*) oraz skali. Jak twierdzą autorzy pozostałe poziomy georeferencji opisane w (Christian and Hendrik, 2019) nie pozwalają na pełną automatyzację. Klasa *IfcProjectedCRS* umożliwia definiowanie docelowego globalnego układu współrzędnych z wykorzystaniem atrybutów. Uważa się, że rozwiązanie to wymaga dalszych rozszerzeń szczególnie w obszarze projektów infrastrukturalnych (Jaud i in., 2022). W (Jaud i in., 2019) zwrócono uwagę na krytyczność poprawnej georeferencji dla przeprowadzania projektów infrastrukturalnych (np. kwestia automatyzacji prac czy wymiarowania), ale również dla celów konwersji danych IFC do formatów GIS i ogólnie integracji danych budowlanych z cyfrowymi danymi geoprzestrzennymi. Szczegółowa matematyczna analiza wpływu braku lub błędnego nadania georeferencji w odniesieniu do formatu IFC została opracowana w (Ugla & Horemuz, 2018). Natomiast szczegółowo georeferencja w kontekście BIM została przedstawiona w (Jaud i in., 2020).

Jednym ze zidentyfikowanych problemów jest brak świadomości interesariuszy na temat potrzeby poprawnej georeferencji modeli (Noardo, Krijnen, i in., 2021), co również prowadzi do trudności w przeprowadzeniu procesów integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych. Co więcej, przeprowadzone analizy w ramach *benchmarków* narzędzi dla celów integracji BIM i GIS pokazały braki w obszarze wspomagania nadawania georeferencji (Noardo i in., 2020). W (Diakite & Zlatanova, 2020) zaproponowano automatyczne nadawanie lub poprawę georeferencji modelu BIM poprzez

odniesienie do poligonu reprezentującego dany obiekt w obszarze danych geoprzestrzennych. Jednak jak sami autorzy wskazują dokładność takiego rozwiązania jest niewystarczająca dla niektórych scenariuszów użycia. Podobne podejście, ale poprzez wskazanie odpowiadających sobie punktów modelu oraz na obrazie lub z wykorzystaniem wektora zostało opisane w (Zhu, Wang, Wang, & Tan, 2019). Z uwagi na brak spójności i interpretacji georeferencji plików IFC, w (Zhu & Wu, 2021a) opisano holistyczne podejście mające na celu spójne podejście do georeferencji modeli IFC. W (Hakim i in., 2024) zaproponowano wykorzystanie geodezyjnych punktów kontrolnych do zwiększania poziomu georeferencji oraz jej pewności.

Ponadto, ważnymi elementami są działania umożliwiające walidację georeferencji na różnych poziomach w celu zapewnienia odpowiedniej jakości podczas procesów wymiany informacji (Glinka, 2023). Przykładowym elementem wspierającym jest wytworzenie GeoMVD umożliwiającego walidację georeferencji (Glinka i in., 2022a; Jaud & Clemen, 2024) czy też zaproponowanie narzędzi weryfikujących (Christian & Hendrik, 2019).

Szczegółowo aspekty technologiczne dotyczące problematyki związanej z poprawną georeferencją w ujęciu IFC w wersji 4x3 zostały opisane w sekcji IV.3.

III.3.2.3 Wykorzystywane technologie w rozwiązaniach integrujących cyfrowe dane budowlane oraz geoprzestrzenne

Z punktu widzenia technologicznego oraz budowy rozwiązań, przeanalizowano możliwe do zaimplementowania technologie w celu budowy algorytmów umożliwiających integrację cyfrowych danych budowlanych i geoprzestrzennych.

Ponadto, przeanalizowano rozwiązania pozwalające na ekstrakcję informacji z danych geoprzestrzennych, które mogą wspierać wybrane procesy decyzyjne, a także przykłady zastosowań, które zostaną opisane w dalszej części pracy.

A. Analizator składniowy danych

Pierwszym z elementów, który jest szczególnie istotny dla odczytu danych budowlanych w formacie IFC są narzędzia do ich wczytywania i zapisu w zdefiniowanych strukturach zwane analizatorami składniowymi (dalej *parser*). Format IFC jest reprezentowany z wykorzystaniem standardu STEP oraz języka modelowania EXPRESS. Analizatory składniowe umożliwiają przejście z takiej reprezentacji np. do obiektowego zaprezentowania danych z wykorzystaniem różnych języków programowania. Najczęściej wykorzystywanym parserem w przypadku języka programowania Python jest biblioteka *ifcopenshell* (Ifcopenshell, 2024a), który zapisuje dane do struktur danych, takich jak listy, słowniki i klasy, co umożliwia łatwą manipulację i analizę danych. Na bazie tej biblioteki realizowane są również rozwiązania umożliwiające integrację cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych np. (Zhu & Wu, 2021b). Wśród innych parserów należy wyróżnić:

- *xBIM Toolkit* który jest bogatą w funkcje biblioteką do pracy z danymi IFC, przeznaczoną dla platformy .NET. *xBIM* umożliwia nie tylko odczyt i zapis plików IFC, ale także zaawansowaną manipulację danymi, w tym wizualizację modeli i zarządzanie relacjami między obiektami. Istnieją również rozwiązania oparte o tę bibliotekę umożliwiające integrację cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych (Leng i in., 2021)
- *IFCPlusPlus*, otwarta źródłowa biblioteka przeznaczona dla języka programowania C++ (Xu i in., 2020)

- Bimserver, rozwiązanie do zarządzania danymi w formacie IFC oraz umożliwiające współpracę. Umożliwia również budowę aplikacji integrujących cyfrowe dane budowlane oraz geoprzestrzenne (Chen i in., 2018)
- IFC.js to otwarta źródłowa biblioteka JavaScript, która umożliwia parsowanie i interakcję z IFC w szczególności w obszarze wizualizacji modeli BIM (Building Information Modeling) w przeglądarkach internetowych. Dzięki integracji z WebGL oraz Three.js, IFC.js pozwala na wydajne wyświetlanie trójwymiarowych modeli obiektów, wspierając tym samym interoperacyjność i usprawniając współpracę między różnymi narzędziami projektowymi.

Z drugiej strony, do odczytu danych geoprzestrzennych najczęściej wykorzystywane są rozwiązania takie jak GEOS czy GDAL OGR pozwalające na realizację zadań związanych z danymi wektorowymi czy też rastrowymi. Na ich bazie oparte są dostępne biblioteki do przetwarzania danych geoprzestrzennych w języku programowania Python, takie jak shapely czy fiona. Są to również silniki geometryczne do przetwarzania danych geoprzestrzennych.

B. Silniki geometryczne

W przypadku cyfrowych danych budowlanych, wykorzystywane silniki geometryczne pozwalające na przejście z zagnieżdżonego zapisu geometrii do jawnego to przede wszystkim OpenCascade (dalej OCC) oraz CGAL. OCC to kompleksowy zestaw narzędzi do modelowania CAD, pozwalający na tworzenie, manipulację i analizę trójwymiarowych modeli geometrycznych. Natomiast CGAL (Computational Geometry Algorithms Library) to biblioteka zawierająca zaawansowane algorytmy geometryczne, wspierająca zadania takie jak triangulacja, rekonstrukcja powierzchni oraz operacje na bryłach, które są kluczowe w obróbce i analizie trójwymiarowych danych przestrzennych. Oba narzędzia są dostępne dla programistów Python poprzez odpowiednie interfejsy i biblioteki, co umożliwia ich integrację w różnych aplikacjach inżynierskich i naukowych (np. biblioteka ifcopenshell pozwala na wybranie obu silników do przetwarzania geometrii). IFC.js wykorzystuje natomiast jako silnik rozwiązania w języku JavaScript takie jak WebGL oraz Three.js. XBimToolkit natomiast wykorzystuje OCC jako silnik geometryczny.

C. Rozwiązania komercyjne o zamkniętym kodzie źródłowym

W literaturze spotykane są również rozwiązania komercyjne umożliwiające łączenie cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych. Najbardziej rozległe oraz holistyczne, według autora, wydaje się rozszerzenie oprogramowania ArcGIS – ArcGIS GeoBIM (Ismaeil, 2024) kompatybilne z rozwiązaniami firmy Autodesk. Także zwykła wersja (tj. bez rozszerzenia) ArcGIS jest wykorzystywana (AlSaggaf & Jade, 2023). Jednakże wymiana informacji oparta tam jest nierzadko o natywne formaty danych. Innym często spotykanym rozwiązaniem w literaturze jest oprogramowanie SafeSoftware FME (Noardo i in., 2020), które umożliwia przeprowadzanie procesów ETL. Od strony danych geoprzestrzennych jest to narzędzie zazwyczaj nie zawierające błędów, jednak od strony danych budowlanych, np. odczytu formatu IFC nierzadko spotykane są problemy związane z niekontrolowaną utratą informacji np. (Borkowski & To Duc, 2024) czy (Zhu, Wang, Wang, Wu, i in., 2019). Dla celów łączenia danych spotykane jest również wykorzystanie oprogramowania Autodesk Dynamo, które umożliwia programowanie wizualne (Nofal i in., 2022). Również firmy takie

jak Leica czy Trimble oferują rozwiązania umożliwiające integracje cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych, jednak z pojedynczymi możliwościami analitycznymi np. (Niestroj i in., 2018).

D. Rozwiązania bazodanowe

Rozwiązania bazodanowe stanowią obecnie podstawę wielu działań związanych z technologiczną budową rozwiązań w szczególności elastycznej obsługi różnych zastosowań. Są również rekomendowane jako narzędzia wspierające interoperacyjność (ISO/TR 23262:2021 GIS (geospatial) / BIM interoperability, 2021; ISO/TS 19166:2021 Geographic information — BIM to GIS conceptual mapping (B2GM), 2021). Wśród obecnie proponowanych rozwiązań wykorzystywane są zarówno tradycyjne obiektowo-relacyjne bazy danych (oparte o język SQL) (Hijazi i in., 2010; Wyszomirski & Gotlib, 2020), jak nierelacyjne np. Redis (Wyszomirski, 2022) czy grafowe rozwiązania (Lv i in., 2020). W (Zhu i in., 2022) szczegółowo została opisana metodyka wykorzystania grafowych baz danych dla celów integracji BIM i GIS.

E. Algorytmy do ekstrakcji informacji z danych geoprzestrzennych

Ostatnim z planowanych do omówienia elementów w ramach wykorzystywanych technologii w procesach łączących cyfrowe dane budowlane oraz geoprzestrzenne jest kwestia ekstrakcji informacji z danych geoprzestrzennych, w tym szczególności z danych pomiarowych oraz, w zidentyfikowanych przypadkach, metoda łączenia informacji z cyfrowymi danymi budowlanymi. Zakres ten jest bardzo szeroki, dlatego w ramach niniejszego opisu zostaną wypisane przykładowe możliwe do zastosowania algorytmy wraz z odniesieniem do szerokiej literatury dostępnej w tym obszarze.

Jedną z technologii w szczególności rozwijającej się w ciągu ostatnich lat jest fotogrametria, umożliwiająca odtworzenie rzeczywistych obiektów do trójwymiarowej postaci cyfrowej na podstawie zdjęć z wzajemnym pokryciem na podstawie algorytmów takich jak SfM (Structure from Motion), MVS (Multi View Stereo) czy dla danych pozyskiwanych z wyższych pułapów aerotriangulacja. W ten sposób możliwe jest wytworzenie trójwymiarowych modeli typu mesh, ortofotomap czy też fotogrametrycznych chmur punktów, o nieco innej charakterystyce niż te uzyskane z klasycznych metod skaningu laserowego. Różnice w generowanych chmurach punktów została opisana między innymi w (Moon i in., 2019). Patrząc z perspektywy analizy danych fotogrametrycznych proponowane rozwiązania dotyczą między innymi analizy postępów prac budowlanych (Tuttas i in., 2017) dla różnych celów, generowania Numerycznych Modeli Pokrycia Terenu (Ruzgiene i in., 2015) lub Numerycznych Modeli Terenu (Jiménez-Jiménez i in., 2021), budowania trójwymiarowych modeli powykonawczych z wykorzystaniem „kieszonkowych” kamer (Bhatla i in., 2012) czy z kamer umieszczonych na BSL (He i in., 2024). Wykorzystywane są również różne metody uczenia maszynowego do klasyfikacji i segmentacji fotogrametrycznych chmur punktów (Kamari & Ham, 2021) czy ortofotomapy (Glinka i in., 2022b).

W odróżnieniu od metod fotogrametrycznych, w przypadku skaningu laserowego, ze względu na aktywny tryb akwizycji, możliwe jest również penetracja różnych struktur, w tym między innymi wegetacji oraz możliwość analizy wielu odbić dla danej wiązki, co umożliwia, nierzadko, bardziej dokładne pozyskiwanie danych. Z uwagi na podobny końcowy produkt, metody oraz obszary zastosowań będą zbliżone do tych opisanych powyżej. Główne trzy

obszary zastosowań, które należy tu jednak nadmienić to inżynieria odwrotna (Son i in., 2002), analiza *as-built* (P. Owerko & Owerko, 2021), a także różnego rodzaju algorytmy umożliwiające bezpośrednio generowanie trójwymiarowych modeli BIM (scan2BIM) (Bosché i in., 2015).

Obecnie do ekstrakcji informacji z danych geoprzestrzennych oraz łączenia z cyfrowymi danymi budowlanymi wykorzystywane są algorytmy sztucznej inteligencji, w szczególności algorytmy Głębokiego Uczenia Maszynowego. Przegląd wykorzystania oraz analiza różnych zastosowań głębokiego uczenia maszynowego w sektorze budowlanym został wykonany w (Khallaf & Khallaf, 2021).

Ostatnim z omawianych zestawów algorytmów są te wykorzystywane do analizy danych rastrowych, w szczególności, teledetekcji satelitarnej. Również tutaj obecnie wykorzystywane są różne metody głębokiego uczenia maszynowego umożliwiające ekstrakcję określonych informacji poprzez klasyfikację, segmentację czy detekcję obiektów. Szczegółowa analiza algorytmów z tego zakresu została przedstawiona w (Ma i in., 2019).

III.3.2.4 Obszary zastosowań integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych

Na podstawie badań literaturowych, poniżej w formie tabelarycznej (Tab. 5), przedstawiono zidentyfikowane obszary zastosowań integracji cyfrowych danych budowlanych oraz cyfrowych danych geoprzestrzennych, wraz z odpowiednimi odniesieniami do literatury oraz syntetycznym opisem.

Tabela 5 Obszary zastosowań integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych

Zidentyfikowany obszar zastosowania	Syntetyczny opis	Referencja /referencje
Analiza widoczności	Zaproponowanie i obliczenie wskaźników widoczności poprzez integrację BIM oraz GIS dla poszczególnych pomieszczeń w budynku (np. dla celów wyceny nieruchomości)	(Corlu & Isikdag, 2024)
	Analiza widoczności poprzez wytworzenie pola widzenia dla okien modelu oraz analiza zacielenia obiektu na podstawie danych z lotniczego skaningu laserowego.	(Rafiee i in., 2014)
Optymalizacja wykorzystania energii w budynku	Pomiary kamerami termalnymi oraz skanerami laserowymi w połączeniu z BIM w celu budowy Cyfrowego Bliźniaka i dla maksymalizacji wydajności energetycznej i oszczędności.	(Blut i in., 2024)
Smart Cities	Wykorzystanie integracji do planowania działań związanych z infrastrukturą typu sieci uzbrojenia terenu na poziomie miast, wraz z analizą przyszłego zapotrzebowania na media.	(Marzouk & Othman, 2020)
Wybór lokalizacji obiektu	Optymalizacyjne lokalizacji magazynów przemysłowych poprzez integrację BIM i GIS. Ocena 3 wariantów lokalizacji z wykorzystaniem mechanizmów AHP (Analytic Hierarchy process) w odniesieniu do cyfrowych danych budowlanych i różnorodnych kryteriów z zdywersyfikowanych obszarów.	(Asgari Siahboomy i in., 2021)
Mapowanie hałasu	Wykorzystanie danych BIM oraz GIS do analiz rozchodzenia się hałasu w budynku.	(Deng i in., 2016)
Dziedzictwo kulturowe	Wykorzystanie danych pomiarowych w celu wypracowania modeli BIM obiektów dziedzictwa oraz zarządzania nimi (np. analizy z wykonaniem kamer termalnych czy fotogrametrii) i wizualizacją.	(Tsilimantou i in., 2020)
	Wykorzystanie idei scan2BIM i wypracowanie modelu HBIM stanowiska dziedzictwa kulturowego, a następnie	(Pepe i in., 2021)

	konwersja do GIS 3D w celu zarządzania cyfrowymi danymi oraz reprezentacji.	
Analiza ryzyka	Symulacja dwóch wypadków mogących wystąpić w szpitalu: wyciek z instalacji oraz pożar na podstawie cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych, przeprowadzona na dużym stopniu ogólności.	(Peng i in., 2017)
	Analiza w oparciu o integrację mogących wystąpić klęsk żywiołowych związanych z wiatrem oraz jego wpływu na obiekty znajdujące się na danym terenie.	(Nofal i in., 2022)
Zarządzanie obiektem lub obiektami	Wykorzystanie integracji BIM i GIS do zarządzania siecią uzbrojenia terenu w oparciu o format IFC (rozszerzony), CityGML (rozszerzony) oraz podejście bazodanowe wraz z elementami do wsparcia procesu podejmowania decyzji.	(Slongo i in., 2022; M. Wang i in., 2019)
	Wykorzystanie rozwiązań grafowych (łączenie informacji) do wsparcia zarządzania obiektami miejskim w ich cyklu życia poprzez rozszerzenie platformy ACTIVE3D.	(Mignard & Nicolle, 2014)
	Wykorzystanie integracji do zarządzania budynkami w oparciu o oprogramowanie FME oraz ArcGIS	(Vacca i in., 2018)
	Opracowanie algorytmu łączącego różne technologie (BIM, GIS, sensory) dla celów efektywnego zarządzania budynkami	(Mirarchi i in., 2018)
	Opracowanie systemu umożliwiającego zarządzanie danymi oraz ich wizualizację (Web 3D GIS) z wykorzystaniem integracji BIM i GIS dla projektów inżynierii wodnej i hydroenergetycznej	(S. Zhang i in., 2020)
	Opracowanie zintegrowanej platformy BIM-GIS-DCE (domain-specific computational engine) do identyfikacji podatności współzależnych systemów infrastruktury na przykładzie zachowania powiązania kanalizacji deszczowej z budynkami i transportem drogowym podczas powodzi.	(Y. Yang i in., 2021)
	Opis metodyki realizacji systemu umożliwiającego zarządzanie obiektami kolejowymi na zdefiniowanym obszarze na podstawie połączenia cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych.	(Garramone i in., 2022)
	Opracowanie systemu opartego na danych BIM i GIS umożliwiającego zarządzanie infrastrukturą drogową z warstwą wizualizacyjną.	(Cepa i in., 2023)
Logistyka	Optymalizacja operacji przenoszenia i harmonogramu odpływu statków podczas demontażu wielu platform morskich na bazie integracji BIM i GIS.	(Tan i in., 2018)
	Wykorzystanie integracji do śledzenia i zarządzania łańcuchem dostaw w celu np. wyboru optymalnego dostawcy poszczególnych komponentów.	(Deng i in., 2019; Irizarry i in., 2013)
	Usprawnienie realizacji projektu opartego o komponenty modułowe poprzez wykorzystanie integracji.	(Niu i in., 2019)
Nawigacja wewnątrz obiektu	Wybór ścieżek przejścia w skomplikowanych strukturach budynków na podstawie chmur punktów np. dla potrzeb zarządzania klęskami żywiołowymi.	(Boguslawski i in., 2015; Nikoohemat i in., 2020)
	Tworzenie systemów umożliwiających nawigowanie wewnątrz obiektu poprzez konwersję cyfrowych danych budowlanych do formatów np. GIS3D	(Q. Sun i in., 2020; Tarihmen i in., 2020)
Zarządzanie placem budowy	Wykorzystanie oprogramowania ArcGIS w połączenie z cyfrowymi danymi budowlanymi do planowania placu budowy oraz identyfikacji potencjalnych konfliktów w przestrzeni np. przeszkadzające sobie wzajemnie dźwigi czy żurawie wieżowe	(AlSaggaf & Jrade, 2023)
	Wykorzystanie integracji do optymalizacji pracy żurawi wieżowych poprzez wybór odpowiednich lokalizacji.	(Irizarry & Karan, 2012)
	Wykorzystanie cyfrowych danych geoprzestrzennych (geotechnicznych) do zamodelowania struktur geologicznych	(Khan i in., 2021)

	oraz wyznaczenia stref bezpieczeństwa dla obszaru budowy. Przekazanie tych informacji do formatu IFC.	
	Przeprowadzanie analiz bezpieczeństwa na placu budowy poprzez weryfikację różnych scenariuszy w oparciu o cyfrowe dane budowlane oraz geoprzestrzenne	(Q. Yang i in., 2024)
Wizualizacja danych	Wykorzystanie integracji do definiowania wymagań biznesowych we wstępnych fazach inwestycji. Zaproponowanie integracji jako elementu umożliwiającego wizualne zarządzanie projektem.	(Zhong & Hao, 2014)
	Opracowanie modelu danych wykorzystującego łączenie cyfrowych danych budowlanych i geoprzestrzennych do oceny i wizualizacji powodzi.	(Amirebrahimi i in., 2015, 2016)
	Opracowanie rozszerzenia domeny aplikacji CityGML do symulacji procesu budowy budynku	(C. Zhang i in., 2019)
	Wizualizacja komponentów infrastruktury liniowej we wspólnym środowisku danych BIM-GIS opartej o Cesium	(Y. Liu i in., 2023)
Kataster 3D	Wykorzystanie danych wewnątrz budynku do połączenia z danymi katastralnymi np. do wsparcia zarządzania obiektami.	(Atazadeh i in., 2021; Gotlib & Karabin, 2017)
	Opracowanie algorytmu opartego o oprogramowanie FME do reprezentacji danych BIM w odniesieniu do danych katastralnych	(J. Sun i in., 2019)
	Zaproponowanie metodyki wytwarzania baz danych dla katastru 3D poprzez konwersję danych BIM do rozszerzonego formatu CityGML	(Hajji i in., 2021)
Wsparcie projektowania	Optymalizacja przebiegu autostrady poprzez połączenie cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych z wykorzystaniem rozwiązań grafowych. Przeprowadzanie analiz w celu wyboru optymalnego przebiegu pod kątem: wysokościowym oraz horyzontalnym, potencjalnego ryzyka czy przebiegu struktur geotechnicznych	(Zhao i in., 2019)
	Zamodelowanie przebiegu sieci uzbrojenia terenu na podstawie danych pomiarowych (GPR, GPS) oraz przetworzenie do postaci formatu IFC dla celów wsparcia prac.	(Sharafat i in., 2021)
	Opracowanie metodyki dla fazy planowania inwestycji w oparciu o połączenie danych budowlanych oraz geoprzestrzennych na bazie MCDM (multicriteria decision-making).	(Santos i in., 2024)
Realizacja prac budowlanych	Połączenie cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych w celu wsparcia proces realizacji budowy autostrady (głównie kwestie wizualizacyjne).	(Akob i in., 2019)
	Wsparcie procesu podejmowania decyzji poprzez połączenie różnorodnych cyfrowych danych budowlanych oraz danych geoprzestrzennych (np. na temat otoczenia realizowanego obiektu) w szczególności w kontekście czasu (4D).	(A. H. Liu i in., 2021)
	Analiz wolumetryczne (np. pomiar z wykorzystaniem BSL) i powiązanie informacji z modelami i procesami BIM	(De Winter i in., 2022)
	Śledzenie postępu prac budowlanych poprzez połączenie produktów uzyskanych z danych pomiarowych wraz z BIM4D.	
Cyfrowy proces wydawania pozwoleń na budowę	Ekstrakcja określonych informacji z danych BIM, ich połączenie z cyfrowymi danymi geoprzestrzennymi w celu weryfikacji zbioru zasad związanych z cyfrową weryfikacją i wydawaniem pozwoleń na budowę	(Hobeika i in., 2022)
Urbanistyka	Wsparcie planowania zagospodarowania terenu działki poprzez połączenie różnorodnych cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych	(Leng i in., 2021)

Powyższa analiza pokazuje obszary, w których ma zastosowanie integracja BIM i GIS, czy też szerzej ujmując, integracja cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych. Widoczny jest zdecydowanie większy nacisk na zastosowania w obszarze zarządzania obiektami i budowy systemów umożliwiających wsparcie procesów administracyjnych (zarządzanie obiektem, urbanistyka, kataster 3D czy cyfryzacja procesu wydawania pozwoleń na budowę). Od strony budowlanego procesu inwestycyjnego i jego wsparcia, zidentyfikowane aplikacje dotyczą przede wszystkim kwestii logistycznych, zarządzania placem budowy czy zidentyfikowano pojedyncze aplikacje związane z realizacją prac budowlanych. Wydaje się jednak, że liczba tych aplikacji wciąż jest zbyt mała, co wynika z istniejącej ciągle luki umożliwiającej w sposób elastyczny na interoperacyjność pomiędzy cyfrowymi danymi budowlanymi oraz geoprzestrzennymi. Ponadto, duża część opisanych powyżej pozycji literaturowych (Tab. 5), korzysta z oprogramowania komercyjnego, wykorzystującego nierzadko natywne formaty danych, bez odniesienia do standardów otwartych. Natomiast same rozwiązania, według autora, są na stosunkowo niskim poziomie gotowości technologicznej. Widoczna jest więc luka badawcza w obszarze cyfrowych narzędzi wspierających umożliwiających wsparcie różnorodnych procesów integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych.

III.3.2.5 Analiza SWOT

Analiza SWOT (S – Strengths – mocne strony; W – Weaknesses – słabe strony; O – Opportunities – szanse; T – Threats – zagrożenia) integracji BIM i GIS była przeprowadzona przez (Glinka, 2022). Jednakże ze względu na postęp technologiczny, zmiany w standardach oraz nowe publikacje, zarówno w branży geoprzestrzennej, jak i budowlanej, konieczna jest jej aktualizacja, która została przeprowadzona w ramach niniejszej pracy. Ponadto rozszerzono analizę do bardziej holistycznego pojęcia integracji cyfrowych danych budowlanych i cyfrowych danych geoprzestrzennych. Aktualizacja została wykonana na podstawie analizy literaturowej oraz własnych doświadczeń autora. Poniżej w sposób tabelaryczny (Tab. 6) przedstawiono przedmiotową analizę SWOT.

Tabela 6 Analiza SWOT integracji cyfrowych danych budowlanych i geoprzestrzennych (opracowanie własne na podstawie (Glinka, 2022))

ANALIZA SWOT	
SILNE STRONY	SŁABE STRONY
<ul style="list-style-type: none"> • Szersze spojrzenie na budowlany proces inwestycyjny ze względu na zakres danych obu domen oraz szczegółowość. • Wsparcie procesów decyzyjnych oraz ich efektywności poprzez łączenie danych z wielu źródeł (danych o różnej charakterystyce); fuzja danych w celu osiągnięcia efektu synergii • Możliwość monitorowania, kontroli i optymalizacji zasobów podczas realizacji projektu czy nawet w całym cyklu życia obiektu • Wsparcie zadań związanych z zarządzaniem interesariuszami, ryzykiem, kosztami czy czasem w całym cyklu życia obiektu • Możliwość przeprowadzania zaawansowanych analiz geoprzestrzennych poprzez interakcję 	<ul style="list-style-type: none"> • Brak jednolitego standardu wymiany informacji i niejednoznaczność terminów używanych w obu domenach • Utrata informacji podczas procesu integracji i konwersji (np. konwersja danych BIM na dane GIS); brak rozwiązań dwukierunkowych spowodowanych brakami w interoperacyjności • Nadanie globalnego aspektu przestrzennego danym BIM – problemy z georeferencją tego typu danych • Poziom technologiczny: potrzeba dużej mocy obliczeniowej do przekształcenia danych w informacje docelowe, ograniczenia istniejącego oprogramowania/narzędzi • Braki w świadomości decydentów wyższego szczebla na temat korzyści płynących

<p>między cyfrowymi danymi budowlanymi oraz cyfrowymi danymi geoprzestrzennymi</p> <ul style="list-style-type: none"> •Wsparcie procesów związanych z zarządzaniem zasobami/obiektem •Wykorzystanie nowych podejść do łączenia danych, umożliwiających innowacyjne podejście i elastyczne łączenie z innymi domenami np. prefabrykacja, analizy środowiskowe, Cyfrowe Bliźniaki •Uczenie maszynowe podnosi jeszcze bardziej zdolności analityczne systemów integrujących cyfrowe dane geoprzestrzenne oraz budowlane, a także umożliwia automatyzację prac. •Możliwość automatyzacji prac oraz budowy rozwiązań wspierających inżynierów realizujących zadania wynikające z budowlanego procesu inwestycyjnego (np. w ramach GOI) 	<p>z integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych</p> <ul style="list-style-type: none"> •Trudności w interoperacyjności ze względu na różnice pomiędzy charakterystyką danych •Różnice w stosowanych ramach pracy (framework) oraz specyfikacjach, które są wzajemnie niekompatybilne np. BCF, IDS itd. •Trudności w budowaniu narzędzie weryfikacyjnych dostosowanych do danych zarówno geoprzestrzennych jak i budowlanych ze względu na charakterystykę domen
<p>SZANSE</p>	<p>ZAGROŻENIA</p>
<ul style="list-style-type: none"> •Potencjał zastosowań – znajdowanie nowych sposobów wykorzystania integracji w różnych obszarach •Opracowanie standardów przechowywania i przetwarzania danych i informacji z obu domen •Wypracowanie systemów łączących dane BIM i GIS na dużą skalę – np. pojawienie się CIM (City Information Model), spójnych systemów zarządzania infrastrukturą •Integracja z sensorami typu IoT dla celów budowy Cyfrowych Bliźniaków •Wykorzystanie integracji na poziomie krajowym lub samorządowym – rozwój np. katastru 3D, procesów wspomagania decyzji planistycznych, procesów przeglądu i wydawania pozwoleń na budowę; dostosowanie istniejących zasobów oraz ram prac geodezyjnych do wymagań związanych z BIM •Wysoki potencjał związany z dalszym rozwojem metod Uczenia maszynowego (Sztucznej Inteligencji) w celu budowy automatycznych rozwiązań wspierających różne etapy prowadzenia inwestycji 	<ul style="list-style-type: none"> •Zakończenie prac nad opracowaniem standardów: niepowodzenie w opracowaniu standardów. •Brak wsparcia ze strony twórców oprogramowania. Rozwój natywnych formatów danych. •Pojawienie się innych technologii lub rozwój BIM i GIS oddzielnie •Ciągły brak zrozumienia i świadomości korzyści płynących z integracji. Ograniczenia legislacyjne powodujące stagnację w rozwoju. •Dysproporcja w rozwoju w obu technologiach •Bezpieczeństwo danych, które w przypadku rozwijających się technologii cyfrowych, musi być analizowane •Trudności w cyfryzacji procesów w tym np. opory przed zmianami czy trudności w finansowaniu zmian ze względu na braki kompetencyjne, sytuacje gospodarczą itp.

ROZDZIAŁ IV. Proces integracji cyfrowych danych geoprzestrzennych oraz budowlanych

Na wstępie autor chciałby zaznaczyć, że rozdziały 4 i 5 stanowią część twórczą pracy rozszerzającą aktualny stan wiedzy w obszarze integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych. Opracowane w ramach rozdziałów cztery i pięć rozwiązania mogą być traktowane jako kontinuum, w ramach którego przedstawione i zaimplementowane w rozdziale czwartym rozwiązania stanowią bazę do realizacji poszczególnych cyfrowych narzędzi wspierających w rozdziale piątym.

W niniejszym rozdziale, pierwszym jego elementem są badania mające na celu identyfikację przykładów zastosowania integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych w całym cyklu życia obiektu. Badania te obejmują krótki opis, podstawowe wymagania informacyjne oraz aspekty technologiczne poszczególnych zidentyfikowanych przykładów zastosowania.

Na podstawie analizy zidentyfikowanych przykładów zastosowania w toku prac opracowano schematy blokowe uogólnionego procesu integracji cyfrowych danych geoprzestrzennych oraz budowlanych, zawierające identyfikację poszczególnych działań, ze szczególnym uwzględnieniem wymagań informacyjnych niezbędnych do realizacji tych procesów. Poszczególne elementy schematów zostały również przeanalizowane pod kątem możliwości implementacji otwartych standardów BIM. W ramach prac stworzono także schematy konwersji pomiędzy cyfrowymi danymi budowlanymi a geoprzestrzennymi, które następnie zostały wdrożone w postaci algorytmów.

Ponadto w ramach przeprowadzonych badań opisano zarówno podstawy teoretyczne, jak i zaprezentowano zaimplementowane w toku prac algorytmy umożliwiające na elastyczne podejście do integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych. W szczególności opracowane algorytmy umożliwiają analizę georeferencji, przetwarzanie geometrii z postaci zagnieżdżonej do jawnej, obsługę danych alfanumerycznych czy dwukierunkową konwersję pomiędzy cyfrowymi danymi budowlanymi oraz geoprzestrzennymi. Część z prac jest rozszerzeniem publikacji (Glinka i in., 2024), której elementy, w szczególności, przejście z reprezentacji zagnieżdżonej do jawnej dla obiektów kubaturowych oraz eksport danych do bazy danych oraz chmur punktów, były realizowane na bazie doświadczeń wynikających z pracy jako asystent badawczy w projekcie ERJU. Rozszerzenie dotyczyło przede wszystkim analiz teoretycznych oraz implementacji rozwiązań umożliwiających uzyskanie reprezentacji geometrycznej w formie jawnej dla obiektów infrastrukturalnych oraz aktualizacji opisu georeferencji dla IFC w wersji 4X3, biorąc pod uwagę wszystkie dostępne możliwości zapisu.

IV.1 Zidentyfikowane przykłady zastosowania integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych

Na podstawie analiz literaturowych, rozwiązań z obszaru otoczenia społeczno-gospodarczego czy też doświadczeń, analiz i obserwacji autora, w toku prac zidentyfikowano oraz przeanalizowano przypadki zastosowania integracji cyfrowych danych budowlanych oraz

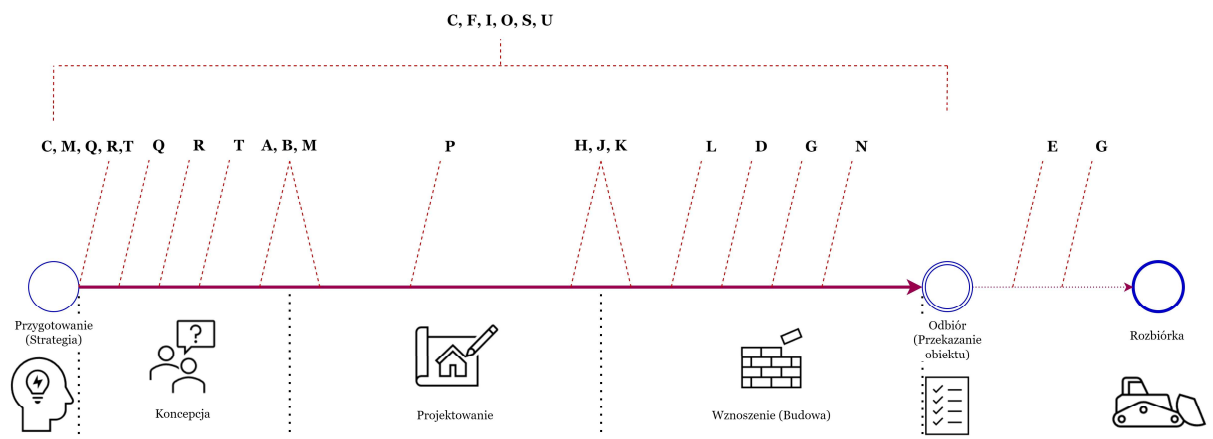
geoprzestrzennych. Należy tu zaznaczyć, że przedstawione poniżej zidentyfikowane przykłady zastosowania dotyczą przede wszystkim wykorzystania w branży budowlanej. Osobną, równie liczną lub nawet liczniejszą mogą stanowić przypadki użycia w obszarze geoinformatycznym. Przykładami mogą być tutaj kwestie dotyczące budowania systemów katastru 3D czy jego elementów, który powinien być również zasilany trójwymiarowymi obiektami modelowanymi z wykorzystaniem technologii BIM (ISO/TR 23262:2021 GIS (geospacial) / BIM interoperability, 2021).

Poniżej zostały zebrane poszczególne zidentyfikowane przypadki użycia wraz z ich krótkim opisem i przykładami realizacji, etapem procesu inwestycyjnego (cykl życia obiektu zgodnie z Rys. 3), głównym kierunkiem przepływu informacji pomiędzy domenami (BUD – cyfrowe dane budowlane, GEO – cyfrowe dane geoprzestrzenne), aspektem technologicznym (proponując koncepcyjnego rozwiązania problemu z punktu widzenia technologicznego) oraz wymaganiami informacyjnymi (w podstawowej wersji – jaka informacja musi być zawarta w modelu oraz jaka informacja jest potrzebna z punktu widzenia domeny geoprzestrzennej).

Docelowa forma opisywanych przykładów zastosowania powinna zostać zmaterializowana w postaci map procesów, zgodnie z IDM, uzupełniona analizą przepływów informacji dla poszczególnych scenariuszy wraz z identyfikacją wymagań informacyjnych np. w postaci wytycznych.

Opisywane poniżej przypadki zastosowania mogą być realizowane przez różne dane oraz na różne potrzeby. Na przykład, dla obiektów kubaturowych analiza ryzyka będzie oparta o nieco inne dane niż dla obiektów infrastrukturalnych.

Poniżej, na osi czasu, zaznaczono poszczególne zidentyfikowane przypadki użycia, co pozwala na ich wizualizację oraz lepsze zrozumienie ich rozmieszczenia w kontekście cyklu życia obiektu (Rys. 20). Poszczególne litery na rysunku odnoszą się do opisywanych przypadków zastosowania w dalszej części.



Rysunek 20 Zidentyfikowane przykłady zastosowania i ich umiejscowienie w ramach etapów cyklu życia obiektu

W przypadku opisu kierunku integracji wykorzystano symboliczne przedstawienie, w którym:

- → oznacza konwersję z jednej domeny do drugiej,
- → & ← oznacza wykorzystanie dodatkowego łącznika (np. bazy danych czy modeli danych) do celów połączenia danych,

- ↔ oznacza dwukierunkową konwersję (możliwość konwersji w obie strony dla celów danego scenariusza użycia).

Odnosząc się do wymagań informacyjnych związanych z opisanymi poniżej przykładami zastosowań, kluczowym aspektem jest georeferencja plików, stanowiąca krytyczny parametr determinujący możliwość realizacji procesów integracyjnych. Z tego względu nie została ona uwzględniona w wymaganiach opisanych poniżej jako wymaganie oczywiste.

Powyżej opisane terminy: przypadek użycia, przykład zastosowania oraz scenariusz użycia, są pojęciami, które w istocie odnoszą się do tego samego zagadnienia i mogą być używane zamiennie w kontekście niniejszej pracy.

A. Wykrycie i przeprowadzenie analizy potencjalnych kolizji na podstawie cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych (kolizje zewnętrzne)

Kierunek	BUD → GEO
Cykl życia	koncepcja, projektowanie
Opis	Przeprowadzanie analiz kolizji mogących wystąpić pomiędzy zbiorami zamodelowanych danych jest jednym z procesów wspierających w ramach prowadzenia inwestycji w oparciu o technologię BIM, w szczególności podczas etapu projektowania i koordynacji prac. Jednakże w przypadku obiektów mających swoją reprezentację w zbiorze cyfrowych danych geoprzestrzennych, problem ten staje się nieco bardziej skomplikowany. Wynika to z faktu, że dla celów przeprowadzania analizy kolizji, dane muszą być w jednym ekosystemie. Dlatego też, w ramach niniejszego przypadku użycia proponowane jest wykorzystanie konwersji cyfrowych danych budowlanych do domeny geoprzestrzennej umożliwiając przeprowadzanie analiz kolizji dla powyżej opisanego scenariusza.
Technologia	Konwersja cyfrowych danych budowlanych do schematów umożliwiających analizy geoprzestrzenne (np. bazy danych PostGIS, format Shapefile). Narzędzia do przeprowadzania analiz kolizji np. zintegrowane z CDE i umożliwiające adnotację poprzez wykorzystanie BCF.
Wymagania informacyjne	Do zdefiniowania wymagań informacyjnych potrzebne są elementy dotyczące zbiorów danych oraz ich poziomów szczegółowości. Ponadto, mogą być potrzebne do zdefiniowania informacje jakie powinny się znaleźć w obu zbiorach np. zakres danych czy poziom dokładności dla celów oceny pewności wystąpienia kolizji.

B. Analizy dotyczące potencjalnego ryzyka mogącego wystąpić w inwestycyjnym procesie budowlanym

Kierunek	BUD → GEO
Cykl życia	przygotowanie, koncepcja, projektowanie
Opis	Analiza ryzyka jest jednym z obszarów kluczowych dla efektywnego zarządzania projektami budowlanymi, pozwalająca na identyfikację, ocenę i kontrolę potencjalnych zagrożeń, które mogą wpłynąć na harmonogram, budżet oraz jakość realizacji inwestycji. Dane geoprzestrzenne (w tym również otwarte dane) mogą wspierać ocenę

	i analizę ryzyka, w szczególności, w początkowych fazach budowlanego procesu inwestycyjnego. Poprzez takie analizy istnieje możliwość identyfikacji i oceny poszczególnego ryzyka inwestycji np. analiza zagrożenia powodziowego na podstawie map czy też analiza wpływów potencjalnych deformacji terenu. Ponadto cyfrowe dane geoprzestrzenne mogą wspomóc procesy monitorowania ryzyka.
Technologia	Algorytmy i oprogramowanie umożliwiające automatyczne pobieranie oraz analizowanie zintegrowanych danych, a na podstawie analiz, identyfikacja i ocena ryzyka np. możliwość podtopień czy ocena potencjalnych odkształceń ze względu na nierównomierne osiadanie terenu.
Wymagania informacyjne	W zależności od przedmiotu analizy, mogą być wymagane różne dane o zróżnicowanym stopniu szczegółowości oraz charakterystyce. Docelowe wymagania informacyjne powinny definiować te kwestie. Obszar analiz powinien być zdefiniowany np. w ramach klasy <i>IfcSite</i> .

C. Przechowywanie cyfrowych danych geoprzestrzennych oraz cyfrowych danych budowlanych w jednolity sposób w celu prowadzenia dystrybucji wymiany informacji w sposób ustrukturyzowany

Kierunek	BUD → & ← GEO
Cykl życia	przygotowanie, koncepcja, projektowanie, budowa
Opis	Odpowiednie przechowywanie danych i zarządzanie nimi jest kluczowe w przypadku prowadzenia inwestycji budowlanych. Najczęściej w technologii BIM do tego celu wykorzystywane są platformy CDE. W ramach CDE oczekiwana jest możliwość przechowywania oraz dystrybucji danych również o charakterze geoprzestrzennym czy też zintegrowanych danych poprzez wykorzystanie usług i serwisów.
Technologia	Rozwój funkcjonalności platform CDE umożliwiający w sposób ujednolicony zarządzanie różnymi typami danych. Implementacja rozwiązań opartych o Web Semantic Technology np. OWL, umożliwiających łączenie danych o różnej charakterystyce (na podstawie semantyki i ontologii). Połączenie idei openCDE oraz openGIS. Zdefiniowanie interfejsów oraz API do zarządzania zintegrowanymi danymi.
Wymagania informacyjne	Szczegółowy opis danych będących przedmiotowymi w celu wyboru odpowiednich algorytmów integracji.

D. Analiza postępu prac budowlanych poprzez połączenie cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych

Kierunek	BUD → & ← GEO
Cykl życia	budowa
Opis	Rozwój w technologiach pozwalających na akwizycje dużej ilości gęstych danych geoprzestrzennych, umożliwia dostarczanie aktualnych informacji o obiektach. W przypadku realizacji prac możliwe jest więc monitorowanie postępu prac budowlanych i konfrontacja z harmonogramem np. zapisanym w plikach IFC (BIM 4D). Możliwy jest więc bieżący odbiór prac oraz identyfikacja

	ewentualnych opóźnień, co znowu implikuje wsparcie procesu decyzyjnego i możliwość podjęcia działań. Szczególnie przydatne w tym obszarze mogą być pomiary z wykorzystaniem BSL, metod fotogrametrycznych czy skaningu laserowego, ale również, patrząc w perspektywie kilkuletniej, wykorzystanie teledetekcyjnych danych satelitarnych.
Technologia	W zależności od stosowanej technologii pozyskiwania danych potrzeba jest wypracowania różnych algorytmów umożliwiających ekstrakcję określonych informacji np. segmentacja chmur punktów czy też obrazowań. Zależne jest to również od charakterystyki obiektu. Ponadto mogą istnieć różne metody łączenia informacji i określania postępu prac budowlanych.
Wymagania informacyjne	W ramach cyfrowych danych budowlanych – format IFC, w celach porównawczych muszą być zawarte informacje na temat harmonogramu. Ponadto, powinny być zdefiniowane informacje o częstotliwości raportowania postępu oraz wykorzystywanych technologiach pomiarowych i wymaganiach co do pomiaru np. dokładnościowych.

E. Wsparcie procesów zarządzania obiektem poprzez połączenie cyfrowych danych budowlanych i geoprzestrzennych

Kierunek	BUD → & ← GEO
Cykl życia	konserwacja i utrzymanie
Opis	Zarządzanie obiektem czy też zarządzanie aktywami jest najczęściej najdłuższym etapem w cyklu życia obiektu. Odpowiednie podejście do zarządzania posiadanymi danymi jest kluczowe z uwagi na koszty wynikające z utraty informacji na tym etapie. Tworzenie rozwiązań opartych o łączenie cyfrowych danych budowlanych geoprzestrzennych może więc stanowić szansę na bardziej efektywne zarządzanie obiektem, a co jest tego efektem, minimalizować koszty operacyjne np. poprzez nadanie kontekstu przestrzennego dla różnych działań. Ponadto, w przypadku odpowiednich rozwiązań, możliwe jest dalsze łączenie struktur w celu budowy Cyfrowych Bliźniaków poprzez integrację z sensorami IoT.
Technologia	Opracowanie rozwiązań pozwalających na zapis modelu powykonawczego w formie umożliwiającej zarządzanie nim poprzez np. obiektowo-relacyjne czy grafowe bazy danych z nadanym kontekstem geoprzestrzennym. Połączenie z oprogramowaniem do zarządzania obiektami oraz sensorami IoT.
Wymagania informacyjne	Określenie potrzeb wynikających z zarządzania obiektem/obiektami oraz zdefiniowanie elementów czy też zjawisk, które powinny podlegać obserwacji poprzez zaimplementowane sensory czy też zaplanowane ze zdefiniowaną częstotliwością sesje pomiarowe. Docelowo wymagania te powinny być zdefiniowane w ramach AIR, którego realizacją jest AIM.

F. Geolokalizacja projektu

Kierunek	BUD → GEO
Cykl życia	przygotowanie, koncepcja, projektowanie, wznoszenie

Opis	Na poziomie organizacyjnym i optymalizacji prac, wsparcie możliwości nadawania geolokalizacji już na etapie nazewnictwa może być kluczowe z punktu widzenia zarządzania projektami czy nawet portfelem projektów. W ramach BIM, standaryzacja nazw jest jednym z elementów standardowych działań. Propozycja standaryzacji nazw w postaci kilometrażu dla obiektów infrastrukturalnych lub obiektów z nimi powiązanych może być rozpatrywana jako element łączenia cyfrowych danych budowlanych i geoprzestrzennych na poziomie organizacyjnym.
Technologia	Rozwiązanie umożliwiające zarządzanie danymi na podstawie warunków dotyczących nazw plików dostosowane dla danego projektu np. platforma CDE z taką cechą funkcjonalną. Od strony weryfikacji umieszczenia, oprogramowanie umożliwiające przeliczenie kilometrażu zdefiniowanego w nazwie pliku do współrzędnych globalnych np. w zdefiniowanej strefy odwzorowawczej. Ponadto moduły umożliwiające połączenie tych informacji z modelem informacyjnym.
Wymagania informacyjne	Standaryzacja nazw oraz jej wykorzystanie powinno być szczegółowo opisane w ramach EIR w części ogólnej dotyczącej standaryzacji nazw lub w dokumentach pochodnych np. BEP.

G. Wsparcie nawigowania i wyszukiwania terenowego obiektów lub komponentów

Kierunek	BUD → GEO
Cykl życia	wznoszenie, konserwacja i utrzymanie
Opis	W procesach wznoszenia obiektów czy, przede wszystkim, podczas ich eksploatacji, w szczególności dla rozległych inwestycji, wyszukiwanie komponentów w terenie i nawigowanie do nich w celu ich szczegółowej identyfikacji może być procesem wspierającym. W przypadku potrzeby likwidacji usterki, wymiany pogwarancyjnej czy serwisu jakiegoś urządzenia tego typu scenariusz użycia może pozwalać na zwiększenie szybkości działania.
Technologia	Wypracowanie rozwiązań (najpewniej mobilnych) umożliwiających wyszukiwanie terenowe oraz nawigowanie do wybranych obiektów znajdujących się w modelu do zarządzania obiektem/zasobami.
Wymagania informacyjne	W ramach modelu informacyjnego musi być dostęp do informacji geoprzestrzennej dotyczącej poszczególnych elementów całego modelu w celu możliwości wyszukania terenowego. Dodatkowo muszą być zawarte odpowiednie odniesienia do dokumentów czy danych alfanumerycznych. Ponadto musi być jasno zweryfikowany układ współrzędnych płaskich oraz wysokościowych, a także określone powinny być parametry dokładnościowe umiejscowienia komponentów czy też samej nawigacji.

H. Zarządzanie bezpieczeństwem oraz analizy bezpieczeństwa w obiekcie/dookoła obiektu

Kierunek	BUD ↔ GEO
Cykl życia	projektowanie, wznoszenie

Opis	Cyfrowe dane geoprzestrzenne pozwalają nadać kontekst podejmowanym działaniom związanym z procesem budowlanym. Poprzez połączenie z cyfrowymi danymi budowlanymi, istnieje możliwość przeprowadzenia analiz dotyczących np. usytuowania maszyn i ich wpływu na bezpieczeństwo. Ponadto mogą być tworzone strefy bezpieczeństwa, które w połączeniu z sensorami monitorującymi plac budowy, tworzą możliwości podjęcia bieżących działań w przypadku identyfikacji zagrożenia.
Technologia	Opracowanie algorytmów umożliwiających na podstawie modelu oraz danych suplementarnych (w tym danych geoprzestrzennych) określanie parametrów dotyczących bezpieczeństwa. Wytworzenie oprogramowania umożliwiającego śledzenie zachowań niebezpiecznych czy niezgodnych z przyjętymi zasadami.
Wymagania informacyjne	W zależności od obiektu powinny zostać określone parametry bezpieczeństwa oraz dane wsadowe do przeprowadzania analiz wraz z definicją obszaru analiz czy poziomem szczegółowości danych.

I. Analiza oddziaływania inwestycji budowlanej na środowisko

Kierunek	BIM → GIS
Cykl życia	przygotowanie, koncepcja, projektowanie, wnoszenie
Opis	Wpływ inwestycji na środowisko jest istotnym czynnikiem, który musi być brany pod uwagę podczas planowania i realizacji projektów budowlanych. Obejmuje on ocenę potencjalnych skutków działań budowlanych na ekosystemy, jakość powietrza i wody, zasoby naturalne, bioróżnorodność czy mieszkańców, a także wdrażanie strategii minimalizujących negatywne oddziaływania na środowisko. Analiza tego wpływu może być również oparta na podstawie cyfrowych danych geoprzestrzennych, w celu np. oceny ilości zlikwidowanego drzewostanu czy też opracowywania narzędziami geostatystycznymi wpływu na otoczenie. W przypadku przekroczenia zdefiniowanych metryk możliwe jest podjęcie działań.
Technologia	Algorytmy i rozwiązania umożliwiające analizowanie danych geoprzestrzennych np. z wykorzystaniem rozwiązań Uczenia Maszynowego oraz ich połączenie z cyfrowymi danymi budowlanymi w celu obliczenia różnych metryk czy wskaźników środowiskowych np. metryka zanieczyszczenia hałasem dla obiektu infrastrukturalnego.
Wymagania informacyjne	Określenie wymaganych do wyznaczenia charakterystyk oraz określenie poziomu dokładności oszacowania. Od strony danych budowlanych, dostarczenie odpowiednich części modelu np. definicja MVD.

J. Wsparcie działań logistycznych dotyczących placu budowy

Kierunek	GEO → BUD
Cykl życia	projektowanie, wnoszenie
Opis	Optymalizacja procesu budowy poprzez analizy umiejscowienia poszczególnych czynników produkcji np. miejsce gromadzenia zasobów pod kątem optymalizacji dostępu, odległości

	czy potencjalnych strat. Zwiększenie efektywności zarządzania przestrzenią budowy poprzez optymalizację wytyczania dróg dojazdowych do inwestycji czy miejsca spoczynku maszyn.
Technologia	Rozwiązania służące analizie placu budowy oraz jego otoczenia w odniesieniu do kontekstu geoprzestrzennego w celu odpowiedniego planowania placu budowy, dojazdu czy miejsca składowania materiałów. Algorytmy umożliwiające analizę i optymalizację różnych procesów.
Wymagania informacyjne	Zależne od docelowego przedmiotu analiz logistycznych. Mogą być wymagane zamodelowane informacje dotyczące harmonogramu w ramach formatu IFC. Od strony geoprzestrzennej opis dokładności oraz zakresu danych potrzebnych do analizy.

K. Wsparcie działań logistycznych dotyczących zasobów i łańcucha dostaw

Kierunek	BIM → & ← GIS
Cykl życia	projektowanie, wznoszenie
Opis	Monitorowanie łańcucha dostaw poprzez połączenie cyfrowych danych budowlanych (w tym danych logistycznych), z systemami GIS może umożliwić wsparcie kontroli dostaw i zasobów. Dzięki temu możliwe jest implementowanie rozwiązań z zakresu Lean jak np. <i>just-in-time</i> . Integracja z systemami w celu zidentyfikowania potencjalnych wpływów dotyczących zasobów na zmiany w harmonogramie (np. identyfikacja wąskich gardeł).
Technologia	Połączenie oprogramowania do zarządzania logistycznego i projektem (zasobami) z cyfrowymi danymi budowlanymi oraz geoprzestrzennymi.
Wymagania informacyjne	Wymagania informacyjne w dużej mierze zależne są od poziomu dojrzałości organizacji oraz wdrożonego oprogramowania.

L. Automatyzacja pozyskiwania danych do tyczenia obiektu dla wsparcia zadań inżyniera geodety

Kierunek	BUD → GEO
Cykl życia	wznoszenie
Opis	Wytworzenie trójwymiarowych modeli z zawartymi informacjami alfanumerycznymi i geometrycznymi oraz semantyką (format IFC) umożliwia przeprowadzenie automatyzacji części prac związanych z przygotowaniem danych. Wykorzystanie odpowiednich algorytmów może pozwolić na automatyzację prac związanych z generowaniem danych do tyczenia obiektu.
Technologia	Algorytmy umożliwiające automatyczne generowanie danych do tyczenia dla obiektów kubaturowych oraz infrastrukturalnych dla zdefiniowanych klas czy też rodzajów geometrii. Algorytmy muszą zapewniać odpowiednią dokładność identyfikacji punktów do tyczenia. Ponadto mogą zostać zdefiniowane metody wykorzystywane do tyczenia w celu np. automatycznego zaprojektowania osnowy realizacyjnej na podstawie modelu.
Wymagania informacyjne	Określenie wymaganej dokładności wytyczenia obiektu oraz wskazanie elementów podlegających tyczeniu w ramach poszczególnych etapów wznoszenia. Ponadto mogą zostać

	zdefiniowane MVD dla poszczególnych elementów podlegających tyczeniu czy też ogólnie dla celów tyczenia.
--	--

M. Analizy geoprzestrzenne np. nasłonecznienie obiektu (zacienienie), wpływ zagrożeń naturalnych czy zjawisk naturalnych

Kierunek	BUD ↔ GEO
Cykl życia	przygotowanie, koncepcja, projektowanie
Opis	Poprzez połączenie cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych istnieje możliwość wsparcia procesu podejmowania decyzji poprzez przeprowadzanie różnego rodzaju analiz geoprzestrzennych, co umożliwi nadanie szerszego kontekstu. Dotyczy to również potencjalnych rozwiązań projektowych i może mieć znaczący wpływ na inwestycję.
Technologia	Rozwiązania do przeprowadzania różnego rodzaju analiz takich jak nasłonecznienie obiektu (np. na podstawie modeli 3D obiektów otaczających inwestycję) czy wpływ zagrożeń naturalnych – przeprowadzanie symulacji na podstawie połączonych cyfrowych danych budowlanych i geoprzestrzennych.
Wymagania informacyjne	Zdefiniowanie elementów, które powinny być przeanalizowane w celu wsparcia procesu decyzyjnego oraz definicja dokładności czy wymaganego poziomu szczegółowości.

N. Analiza porównawcza pomiędzy stanem wybudowanym a zaplanowanym (*as-built vs as-planned*)

Kierunek	GEO → BUD
Cykl życia	wznoszenie (budowa)
Opis	Analiza porównawcza pomiędzy stanem wybudowanym (<i>as-built</i>) a zaplanowanym (<i>as-planned</i>) jest kluczowym elementem w zarządzaniu projektami budowlanymi. Pozwala na ocenę zgodności rzeczywistej realizacji projektu z pierwotnym planem, co jest niezbędne do identyfikacji odchyleń, błędów oraz potencjalnych obszarów wymagających poprawy. Wykorzystanie różnego rodzaju metod pomiarowych daje możliwość porównania stanu rzeczywistego z planowanym. W szczególności proces ten jest istotny w końcowej fazie wznoszenia w celu wygenerowania dokumentacji powykonawczej.
Technologia	Algorytmy porównawcze umożliwiające identyfikacje zmian pomiędzy stanem zamodelowanym (<i>as-planned</i>) oraz rzeczywistym (<i>as-build</i>) oraz wytworzenie modelu powykonawczego. Przykładowo przydatne mogą być rozwiązania typu scan2BIM.
Wymagania informacyjne	Określenie wymagań dokładnościowych oraz tolerancji modelu <i>as-built</i> czy powykonawczego. Zdefiniowanie procedur zmian oraz zatwierdzenia modelu.

O. Przeprowadzanie analiz geotechnicznych

Kierunek	BUD → GEO
Cykl życia	koncepcja, projektowanie i wznoszenie
Opis	Modelowanie warstw geologicznych i analiza interakcji budynku z podłożem gruntowym oraz analizy i wizualizacja tych danych w domenie geoprzestrzennej umożliwia dokładniejszą ocenę

	warunków gruntowych i stabilności terenu, co jest kluczowe dla bezpiecznego projektowania podstawy obiektu (np. fundamentów). Dzięki temu inżynierowie mogą lepiej przewidywać i zarządzać ryzykiem związanym z warunkami gruntowymi na etapie koncepcji, projektowania czy budowy.
Technologia	Integracja danych geoprzestrzennych dotyczących kwestii geotechnicznych z odpowiednim oprogramowaniem oraz cyfrowymi danymi budowlanymi (np. różnymi wariantami). Dostępne są również otwarte dane dotyczące geotechniki stąd możliwość również integracji z tego typu danymi.
Wymagania informacyjne	Określenie wymagań dokładnościowych dotyczących danych geotechnicznych, a także szczegółowość przedmiotu analizy (np. poziom analiz)

P. Wsparcie prac koncepcyjnych oraz projektowych poprzez konwersję cyfrowych danych geoprzestrzennych do formatu IFC (cyfrowych danych budowlanych)

Kierunek	GEO → BUD
Cykl życia	projektowanie
Opis	Obecnie prowadzone zasoby geodezyjne są udostępniane z wykorzystaniem np. GML, co utrudnia ich bezpośrednie użycie jako podstawy do modelowania informacji w technologii BIM. Usprawnienie tego procesu poprzez możliwość konwersji tego typu danych do reprezentacji trójwymiarowej w ramach struktury IFC, daje możliwość lepszej komunikacji oraz, najczęściej, lepszej jakości danych wsadowych w etapie projektowania inwestycji.
Technologia	Rozwiązania umożliwiające konwertowanie danych geodezyjnych np. w formacie GML (na podstawie zdefiniowanego schematu pojęciowego) do trójwymiarowej reprezentacji lub wprost do schematu IFC.
Wymagania informacyjne	Powinny zostać zdefiniowane wymagania dotyczące poziomu szczegółowości oraz zakresu danych, który powinien zostać dostarczony w formie odpowiedniej dla cyfrowych danych budowlanych.

Q. Wsparcie działań koncepcyjnych poprzez wspólną wizualizację i reprezentację cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych

Kierunek	BUD → & ← GEO
Cykl życia	przygotowanie, koncepcja
Opis	Reprezentacja i wizualizacja cyfrowych danych budowlanych w kontekście geoprzestrzennym może wspierać proces podejmowania decyzji np. w przypadku wariantowania inwestycji, zarządzania interesariuszami np. konsultacje czy prowadzenia działań koordynacyjnych w procesie budowlanym.
Technologia	Metody umożliwiające wizualizację cyfrowych danych budowlanych w kontekście danych geoprzestrzennych oparte o np. przeglądarkę (np. wykorzystanie oprogramowania Cesium) czy wersje desktopowe (np. wykorzystanie ArcGIS Pro czy QGIS).
Wymagania informacyjne	Zależą przede wszystkim od rodzaju i charakterystyki inwestycji. W przypadku budownictwa kubaturowego będzie nieco inna potrzeba informacyjna niż w przypadku infrastruktury.

R. Wsparcie procesów wyceny inwestycji poprzez połączenie cyfrowych danych budowlanych z danymi geoprzestrzennymi

Kierunek	BUD → GEO
Cykl życia	przygotowanie, koncepcja
Opis	Kolejnym scenariuszem użycia jest wsparcie procesu wyceny inwestycji. Należy tu jednak zaznaczyć, że nie jest to kosztorysowanie poszczególnych elementów modelu, ale bardziej kwestie związane z warunkami zewnętrznymi i dotyczącymi kwestii logistycznych czy przygotowawczych. Przykładem może być ilość działek jaka będzie potrzebna do wywłaszczenia w przypadku inwestycji infrastrukturalnej.
Technologia	Kwestia technologiczna jest zależna od obszaru, w którym cyfrowe dane geoprzestrzenne mają zostać wykorzystane, jednakże narzędzia powinny umożliwiać przeprowadzanie analiz geoprzestrzennych czy geostatystycznych w celu ekstrakcji i wyceny określonego parametru.
Wymagania informacyjne	Powinny być zdefiniowane w zależności od kontekstu. Może to być sieć dróg w pobliżu inwestycji czy też dane dotyczące działek i budynków znajdujących się na terenie inwestycji. Od strony cyfrowych danych budowlanych, powinien zostać zdefiniowany obszar analizy np. w ramach klasy <i>IfcSite</i> .

S. Pozyskanie i przekazanie danych geodezyjnych (wypracowanych przez geodetę) w formacie IFC

Kierunek	GEO → BUD
Cykl życia	koncepcja, projektowanie, budowa
Opis	Zmiany technologiczne generują potrzebę dostosowywania również metody przekazywania informacji. Oprócz danych pomiarowych geodeta powinien również posiadać narzędzia umożliwiające przekazywanie informacji w sposób ustrukturyzowany i opisany semantycznie, czyli np. z wykorzystaniem formatu IFC. W tym momencie realizowane są różnego rodzaju projekty mające na celu tego typu konwersje np. scan2BIM. Jednakże problematyka ta jest złożona i wymaga dostosowania mechanizmów dotyczących przekazywania wypracowanych w ramach cykli pomiarowych danych.
Technologia	Opracowanie algorytmów umożliwiających konwersję danych pomiarowych lub produktów uzyskanych na ich podstawie do formatów dostosowanych do wymiany informacji w ramach cyfrowych danych budowlanych (np. IFC).
Wymagania informacyjne	Powinny zostać opisane szczegółowo wymagania dotyczących danych oraz kwestii dotyczących potrzeby informacyjnej, w tym dokładności czy poziomu szczegółowości.

T. Wykorzystanie otwartych danych geoprzestrzennych do wsparcia podejmowania decyzji w początkowych fazach inwestycji oraz jako podkład do prac koncepcyjnych

Kierunek	GEO ↔ BUD
-----------------	------------------

Cykl życia	przygotowanie, koncepcja
Opis	Otwarte dane przestrzenne mogą posłużyć jako wsparcie procesu podejmowania decyzji w szczególności w początkowych fazach inwestycji. Ich zasób jest olbrzymi, a dodatkowym atutem jest brak potrzeby wnoszenia opłaty za ich wykorzystanie. Dane mogą posłużyć do podstawowych analiz czy też wizualizacji przebiegu/wariantu danej inwestycji.
Technologia	Rozwiązania umożliwiające pobranie danych dla zdefiniowanego obszaru np. z wykorzystaniem plików IFC oraz np. przekonwertowanie do formatów stosowanych w domenie budowlanej.
Wymagania informacyjne	W ramach opisu inwestycji, wymiany informacji oraz zapotrzebowania na dane, powinny zostać zdefiniowane wymagania wobec danych, a w przypadku spełnienia np. kwestii aktualności danych i rozdzielczości mogą zostać wykorzystane otwarte dane geoprzestrzenne.

U. Nadanie, weryfikacja bądź poprawa georeferencji plików IFC

Kierunek	GEO ↔ BUD
Cykl życia	przygotowanie, koncepcja, projektowanie, wnoszenie
Opis	Georeferencja jest krytycznym kryterium rozpatrując możliwość integracji cyfrowych danych budowlanych oraz cyfrowych danych geoprzestrzennych. Bez tego aspektu nie ma możliwości przeprowadzenia procesów łączenia bądź konwersji cyfrowych danych budowlanych z geoprzestrzennymi. Stąd też potrzeba weryfikacji georeferencji plików IFC oraz wytworzenia narzędzi umożliwiających przeprowadzenie tego procesu, a także pozwalających na transformacje, nadanie czy poprawę georeferencji.
Technologia	Dla celów tego scenariusza powinny zostać opracowane metody umożliwiające weryfikację bądź nadanie georeferencji dla danych BIM, jako parametr krytyczny determinujący możliwość integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych. Ponadto istnieje możliwość implementacji IDS dla celów walidacji i weryfikacji z informacjami opisanymi w ramach EIR.
Wymagania informacyjne	W ramach EIR powinna zostać szczegółowo opisana wymagana metoda georeferencji stosowana w procesie inwestycyjnym.

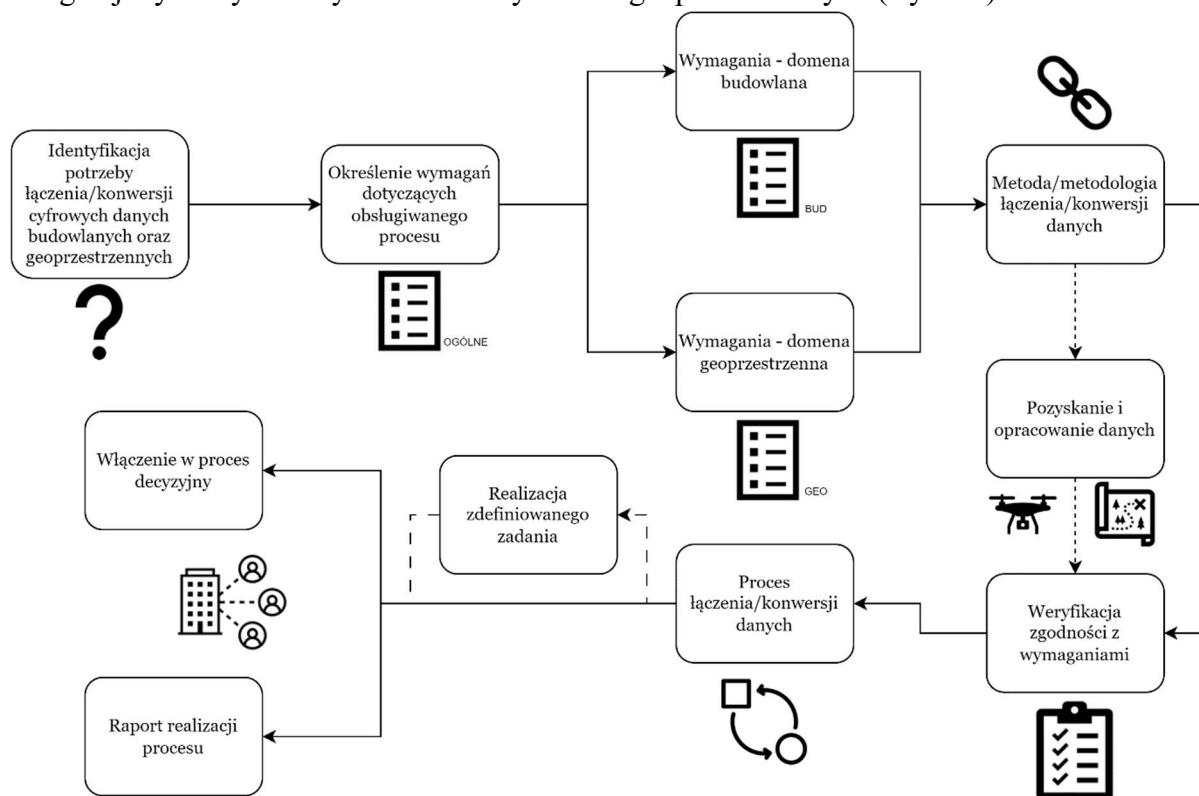
IV.2 Uogólniony opis procesu integracji cyfrowych danych domeny budowlanej oraz geoprzestrzennej

IV.2.1 Uogólniony schemat integracji cyfrowych danych geoprzestrzennych oraz budowlanych

Sam proces integracji, łączenia lub konwersji danych pomiędzy różnymi domenami, a dokładniej rzecz ujmując, potrzeba jego przeprowadzenia, wynika najczęściej z określonych wymagań biznesowych, związanych z konkretnym zdarzeniem lub potrzebą informacyjną czy zapytaniem informacyjnym. Każda potrzeba informacyjna generuje pewne wymagania dotyczące danych, które muszą zostać dostarczone w celu obsługi zdefiniowanego procesu

biznesowego. W sytuacji, gdy działanie odbywa się na styku dwóch różnych domen, pozbawionych ujednoczonej taksonomii, semantyki, metodyki, czy gdy pojawiają się problemy z interoperacyjnością, precyzyjne określenie tych wymagań staje się krytyczne dla prawidłowego przebiegu procesów integracyjnych. Jest wiele pojęć oraz założeń w obu domenach, które są rozumiane w różny sposób, takich jak na przykład georeferencja oraz podejścia do modelowania i zapisu geometrii czy też poziomów szczegółowości. W takim przypadku wymagania informacyjne, dopóki nie powstaną standardy umożliwiające w ujednoczony sposób na wymianę informacji pomiędzy domeną geoprzestrzenną, a budowlaną, muszą być wytwarzane niemal dla indywidualnych przypadków.

Poniżej został zaprezentowany opracowany w toku prac uogólniony schemat procesu integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych (Rys. 21).



Rysunek 21 Opracowany uogólniony schemat procesu integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych

Analizując opracowany schemat, identyfikacja potrzeby łączenia czy też konwersji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych może wynikać z samego procesu inwestycyjnego, jako element obligatoryjny czy w celu uzyskania korzyści w związku z realizacją określonego zastosowania czy też, mówiąc szerzej, przypadku użycia. Należy tu jednak zaznaczyć, że poszczególni interesariusze w budowlanym procesie inwestycyjnym, mogą realizować procesy integracji dla swoich potrzeb. Przykładowo, inżynier geodeta realizujący swoje zadania, nie musi współdzielić bezpośrednio procesów z innymi interesariuszami np. w przypadku tyczenia obiektu w terenie w oparciu o model BIM. Pozostali interesariusze są jednak zobowiązani dostarczyć model informacyjny o zdefiniowanej charakterystyce np. z wykorzystaniem określonego MVD, nadaną georeferencją na najwyższym poziomie w odniesieniu do pliku IFC i tak dalej. Aspekty te

powinny być określone w ramach wymagań informacyjnych oraz pozostałych dokumentów wynikających z metodyki BIM.

Możliwe są jednak również procesy, w których w sam proces integracji danych i podejmowania decyzji będzie zaangażowanych wielu interesariuszy. W takim wypadku, dla każdego z nich, zgodnie z ISO 19650, powinny być zdefiniowane osobno wymagania informacyjne. Takim przykładem może być stworzenie modelu powykonawczego (AIM) przygotowanego dla celów zarządzania informacją na etapie konserwacji i utrzymania, powstającego na bazie AIR. Dla takiego modelu poszczególni wykonawcy (dostawcy informacji) mają również zdefiniowane wymagania informacyjne osobno, jednakże nie jako współdziałają w celu dostarczenia jak najlepszego modelu informacyjnego spełniającego wymagania AIR zamawiającego. Również od strony geoprzestrzennej weryfikowana oraz aktualizowana jest informacja o rzeczywistym obiekcie (*ang. as-built*) i jego komponentach w porównaniu do planowanej sytuacji (*ang. as-planned*).

Bazą dla wymiany informacji są wymagania informacyjne, które znowu często są definiowane na bazie map procesów, gdzie analizowany jest przepływ informacji oraz określone są poszczególne działania jakie należy wykonać w celu realizacji danego procesu. W przypadku łączenia dwóch domen, w zależności od przypadku zastosowania, wymagania te mogą pochodzić z obu stron, jak i tylko z jednej strony. Rozpatrując przykład dotyczący procesu konwersji danych budowlanych do geoprzestrzennych dla celów tyczenia obiektu budowlanego, od strony budowlanej (BIM) muszą zostać dostarczone dane o odpowiedniej charakterystyce (np. zastosowanie MVD), z dokładnie określoną georeferencją czy dozwoloną tolerancją. Od strony geoprzestrzennej wymagania będą dotyczyć mniej kwestii dotyczących danych, ale bardziej aspektów formalnych w tym np. związanych z zagadnieniami prawnymi. Jednakże efektem pracy geodety może być ponownie zaktualizowany model z uzupełnionymi informacjami dotyczącymi dokładności tyczenia np. w ramach zestawu właściwości *Pset_Uncertainty*.

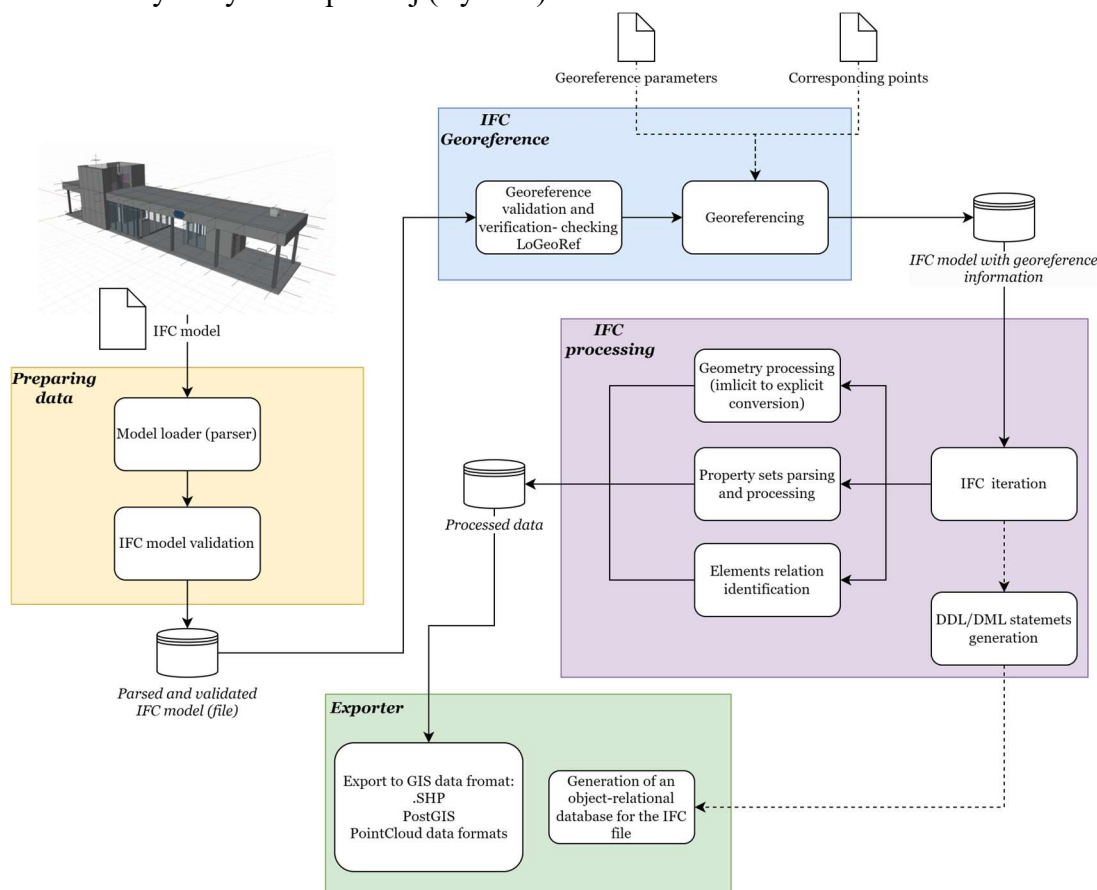
Następnie definiowane powinny być metody wybrane do procesu łączenia czy konwersji, które są mocno determinowane wymaganiami oraz charakterystyką np. obiektu czy etapu w cyklu życia. Nieco inne metody będą dla obiektów infrastrukturalnych i kubaturowych oraz inne metody będą stosowane dla bardziej zaawansowanego modelu informacyjnego (np. o wyższym poziomie szczegółowości) niż modelu będącego w początkowej fazie np. koncepcji. Ponadto w przypadku pozyskiwania danych, metoda łączenia czy konwersji powinna być również znana przed akwizycją oraz przygotowaniem danych. Rozpatrując przykład śledzenia postępu prac budowlanych, nieco inne metody łączenia będą dla danych pozyskiwanych metodą fotogrametryczną, skaningu laserowego czy danych teledetekcyjnych np. z pułapu satelitarnego. Należy mieć jednak na uwadze, że dane te muszą spełniać wymagania zdefiniowane w ramach procesu np. kryterium dokładności czy rozdzielczości.

Kolejnym elementem jest już sam proces integracji poprzez konwersję czy łączenie danych.

Przykładowy proces konwersji bądź łączenia danych od strony otwartych standardów BIM – formatu IFC zawiera w sobie kilka kroków. Po pierwsze wymagane jest wczytanie oraz walidacja danych. Następnie wymagana jest weryfikacja georeferencji oraz ewentualna jej korekcja. W kolejnym kroku, następuje iteracja po pliku IFC w celu odczytu oraz

przetworzenia danych. W przypadku konwersji do danych geoprzestrzennych będzie to zapis danych w zdefiniowanej strukturze, natomiast dla baz danych tworzone będą odpowiednie instrukcje w celu zdefiniowania struktury bazy danych. Jako efekt końcowy możliwy jest eksport danych do różnych formatów, w tym obiektowo-relacyjnych baz danych z tabelami nawiązującymi do jawnej reprezentacji geoprzestrzennej.

Szczegółowo całościowy schemat został opisany w (Glinka i in., 2024) i został zaprezentowany na rysunku poniżej (Rys. 22).

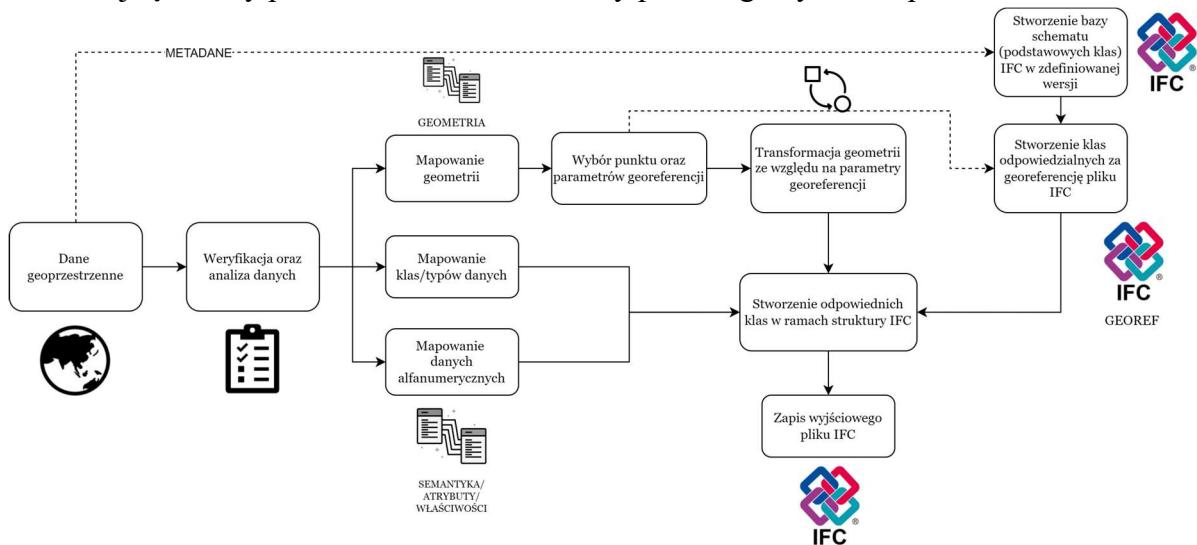


Rysunek 22 Schemat odczytu danych z IFC oraz zapisu do różnych metod reprezentacji (Glinka i in., 2024)

Rozpatrując problematykę konwersji od strony przeciwnej, opracowany w toku prac schemat konwersji cyfrowych danych geoprzestrzennych do budowlanych (IFC) został przedstawiony poniżej (Rys. 23). Najważniejszym etapem jest proces mapowania danych pomiędzy domenami, w celu wygenerowania odpowiednich klas. Zidentyfikowano trzy główne poziomy mapowania: geometryczny, semantyczny oraz alfanumeryczny. Mapowanie geometryczne odnosi się do zidentyfikowania metody reprezentacji oraz dobrania odpowiednich klas (Rys. 39), a także przetworzenia danych ze względu np. na georeferencję. Mapowanie semantyczne odnosi się do odnalezienia odpowiednich klas reprezentujących dany obiekt na podstawie np. kolumny w tabeli atrybutów czy klasy semantycznej. Przykładowo, w przypadku obiektu o typie „ściana”, powinna zostać przypisana klasa *IfcWall*. W przypadku mapowania danych alfanumerycznych, należy znaleźć odpowiednie parametry w zestawach właściwości lub atrybuty. Na podstawie tak zmapowanych danych możliwe jest stworzenie algorytmów oraz wygenerowanie pliku IFC o zdefiniowanej strukturze.

W przypadku działań na danych typowo pomiarowych np. skaniny laserowej do poniższego schematu powinny zostać również dodane działania związane z detekcją oraz

klasyfikacją obiektów czy przetworzeniem geometrii do odpowiedniej reprezentacji np. siatki trójkątów czy powierzchni w celu budowy poszczególnych komponentów modelu.



Rysunek 23 Opracowany schemat konwersji cyfrowych danych geoprzestrzennych do formatu IFC

Ponadto możliwe jest zastosowanie innych metod integracji, które zostały opisane w sekcji III.3.2. Możliwe jest wykorzystanie takich rozwiązań jak np. łączenie na podstawie modeli danych czy ontologii.

Kolejne działanie w ramach uogólnionego schematu procesu integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych jest opcjonalne, zależne od realizowanego przykładu zastosowania, ponieważ dotyczy realizacji zdefiniowanego zadania jak np. wytyczenie obiektu.

Zakończenie procesu to różnego rodzaju kwestie związane z raportowaniem wykonanych prac czy dostarczeniem produktów, które mogą wspomóc proces decyzyjny. Działania te powinny być zintegrowane z platformami CDE do zarządzania informacją w BIM.

IV.2.2 Integracja cyfrowych danych geoprzestrzennych oraz budowlanych w nawiązaniu do standardów otwartych

Kolejnym elementem, który został przeanalizowany w toku badań, jest powiązanie procesów integracji cyfrowych danych geoprzestrzennych oraz budowlanych z otwartymi standardami BIM. Jest to szczególnie istotne, ponieważ umożliwia, w pewnym zakresie, stosowanie wspólnego języka do komunikacji pomiędzy interesariuszami z obu domen, co może usprawnić współpracę i wymianę informacji.

Analizując problematykę od strony otwartych standardów wspierających, IDM stanowi uniwersalne podejście do definiowania przypadków użycia oraz tworzenia map procesów. Ponadto, w ten sposób, możliwa jest identyfikacja aktorów, działań oraz, przede wszystkim, interakcji pomiędzy domenami poprzez analizę przepływów informacji. Rodzaje tych interakcji czy kierunek determinują wymagania informacyjne oraz metody integracji cyfrowych danych geoprzestrzennych i budowlanych.

W BIM, na bazie IDM tworzy się wymagania dotyczące wymiany informacji w procesie/procesach (EIR), które następnie mogą być automatycznie walidowane z wykorzystaniem IDS. Od strony geoprzestrzennej problematyka ta jest nieco bardziej złożona, ponieważ walidacja informacji może odbywać się na różnych poziomach:

metadanych, geometrii czy atrybutów. Co jeszcze utrudnia proces weryfikacji to ilość możliwych formatów danych. Rozpatrując otwarte formaty danych możemy wyróżnić Shapefile, CityGML, LandXML i wiele innych. Z uwagi na ich mnogość, które mogą ponadto posiadać swoją semantykę, trudno jest o stworzenie uniwersalnych mechanizmów weryfikujących podobnych do IDS. Ponadto wymagania mogą dotyczyć bardziej aspektów formalnych dotyczących np. wytycznych czy aktów prawnych, w przypadku realizacji zadań związanych z GOI.

Z drugiej strony, dla danych geoprzestrzennych możliwe jest łatwiejsze zarządzanie geometrią oraz jej weryfikacja, poprzez bezpośredni dostęp (reprezentacja jawna). Wydaje się więc, że odpowiednikiem MVD w domenie geoprzestrzennej będzie generalizacja. Jest to proces upraszczania geometrii (np. zmniejszania ilości wierzchołków) w celu dostosowania danych do skali, w której mają być analizowane czy wyświetlane. Oczywiście generalizacja nie będzie miała opisu w postaci XML, ale widoczna jest pewna analogia.

MVD w domenie geoprzestrzennej może być również rozpatrywane przez pryzmat filtracji danych i eksportu tych docelowych. Operacje te są możliwe do wykonania na różnych formatach danych. Dla Shapefile będzie to wybór obiektów na bazie np. jednej z kolumn tabeli atrybutów, które posiadają określoną wartość czy selekcja na bazie lokalizacji. Dla schematów semantycznych, powinny być zdefiniowane algorytmy analogiczne do MVD w celu eksportu określonej informacji.

Przez różne organizacje proponowane są narzędzia mające na celu również walidację danych w domenie geoprzestrzennej. Na przykład w (Ledoux, 2013) zaproponowano oprogramowanie *val3dity*, umożliwiające walidację geometrii odnoszącej się do GML. Innym rozwiązaniem jest walidator plików GML dla polskich zasobów geoprzestrzennych udostępniany przez GUGIK (*Główny Urząd Geodezji i Kartografii - WalidatorPlikowGML: Walidacja i kontrola danych GML baz EGIB, BDOT500, GESUT, PRNG, BDOT10k, BDOO, b.d.*). Jednak są to, w porównaniu do standardów otwartych BIM takich jak IDS czy MVD, narzędzia rozproszone, nie ujednolicone do wszystkich metod reprezentowania danych w domenie geoprzestrzennej oraz weryfikacji wprost wymagań informacyjnych, jedynie weryfikujące poprawność danych w ujęciu semantyki czy poprawności zapisu.

Wydaje się jednak, że największym wciąż problemem jest terminologia i definicje. Brak jest słowników danych determinujących opis danych w obu domenach. W BIM bSDD jest źródłem terminologii i definicji, natomiast dla cyfrowych danych geoprzestrzennych będą to standardy ISO z serii 191XX czy inne dokumenty opisujące np. dane geodezyjne. Niemniej jednak, standardy te nie mają tak ustrukturyzowanej formy jak bSDD, ponieważ do tej pory takie rozwiązanie nie były potrzebne w kontekście stricte geoprzestrzennym.

Kolejny element otwartych standardów BIM, który został przeanalizowany to BCF. Rozwiązanie to wydaje się, że jest możliwe do zaimplementowania nawet w domenie geoprzestrzennej, ponieważ jest to format (specyfikacja), który w swojej strukturze nie posiada wprost odniesienia do IFC, tylko do jego elementów. Oznacza to, że posiadając unikalny identyfikator oraz pozycję, nawet w systemach GIS powinna być możliwość adnotacji. Szczególnie w przypadku konwersji danych budowlanych w formacie IFC do danych geoprzestrzennych, przy zachowaniu globalnych identyfikatorów (*GlobalID*) jako atrybut zastosowanie BCF powinno być możliwe.

Rozpatrując komunikację, rozwiązaniem służącym do wymiany informacji w BIM jest CDE. W przypadku danych geoprzestrzennych, możliwość ich analizy oraz posługiwania się w ramach platformy jest zależna od dostawcy. Rozpatrując zastosowanie openCDE API dla celów łączenia danych geoprzestrzennych oraz budowlanych, należy więc zastanowić się nad integracją z usługami domenowych rozwiązań openGIS.

IV.3 Rozwiązania technologiczne (stos technologiczny)

W celu zapewnienia obsługi różnych procesów oraz możliwości budowy rozwiązań automatyzujących prace, większość zrealizowanych prac została wykonanych w oparciu o język programowania Python. Rozwiązania opracowano w formie algorytmów oraz modułów umożliwiających przetwarzanie cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych dla celów budowy cyfrowych narzędzi wspierających.

Wśród wykorzystanych bibliotek dostępnych w ramach języka programowania Python należy wymienić:

- *ifcopenshell* - biblioteka umożliwiająca pracę z plikami IFC (Industry Foundation Classes), służy do odczytywania (parsowania), manipulowania i zapisywania danych w formacie IFC,
- *shapely* - biblioteka do manipulacji i analizy geometrii obiektów (geoprzestrzennych) przede wszystkim dwuwymiarowych,
- *pandas* - biblioteka służąca do analizy i manipulacji danymi; umożliwia pracę z danymi w formie tabelarycznej oraz serii czasowych; oferuje funkcje do filtrowania, grupowania, agregowania, łączenia czy przekształcania danych,
- *geopandas* - rozszerzenie biblioteki *pandas* o aspekt geoprzestrzenny; umożliwia zarządzanie danymi geoprzestrzennymi oraz przeprowadzanie różnorodnych operacji takie jak np. złączenie danych,
- *GDAL/OGR* - GDAL (Geospatial Data Abstraction Library) i OGR to biblioteki umożliwiające odczyt, zapis i przetwarzanie różnych formatów danych przestrzennych, takich jak rastry czy wektory,
- *numpy* - biblioteka do obliczeń numerycznych w języku programowania Python; umożliwia pracę z wielowymiarowymi tablicami oraz oferuje funkcje do przeprowadzania operacji matematycznych, liniowej algebry czy statystyki,
- *pyproj* - biblioteka służąca do przekształcania współrzędnych między różnymi globalnymi układami współrzędnych,
- *sqlalchemy* - biblioteka umożliwiająca interakcję z bazami danych SQL. Zapewnia wysokopoziomowe API do mapowania obiektowo-relacyjnego oraz niskopoziomowe narzędzia do budowania zapytań SQL i zarządzania bazami danych
- i wiele innych, takich jak: *scipy*, *math*, *pyclothoids*, *segment-geospatial*.

Ponadto podczas realizacji prac wykorzystano silnik geometryczny OpenCascade, na którym bazuje również biblioteka *ifcopenshell*. Silnik ten posłużył przejściu z zagnieżdżonej reprezentacji geometrycznej do jawnej oraz przetwarzania danych. Samo rozwiązanie jest najczęściej wykorzystywane do prac związanych z przetwarzaniem geometrii trójwymiarowej.

W toku badań wykorzystano również rozwiązania bazodanowe. W szczególności skupiono się na obiektowo-relacyjnych bazach danych. Do ich

implementacji wykorzystano, bazujący na języku SQL, system do zarządzania bazami relacyjno-obiektowymi PostgreSQL, który posiada również różnego rodzaju rozszerzenia. Z punktu widzenia użyteczności do analizy i zapisu danych geoprzestrzennych, takowym rozszerzeniem jest PostGIS umożliwiający zapisywanie danych w tabelach zawierających opis geometrii odniesiony do zdefiniowanego układu współrzędnych. Ponadto, wykorzystano rozszerzenie SFCGAL umożliwiające przetwarzanie trójwymiarowych danych przestrzennych w ramach tabel w strukturze obiektowo-relacyjnej.

Ponadto w toku prac wykorzystywano oprogramowanie komercyjne, które służyło głównie do wizualizacji danych, a także weryfikowania poprawności działania wypracowanych algorytmów (w miejscach, gdzie było to możliwe). Dodatkowo, oprogramowanie to było weryfikowane pod kątem możliwości użycia dla różnych zastosowań oraz barier wynikających z braków w implementacji czy też błędów zawartych w oprogramowaniu. Oprogramowania komercyjne, które były wykorzystywane w toku realizacji prac to FME (firmy SafeSoftware) oraz ArcGIS Pro. FME (Feature Manipulation Engine) to narzędzie do integracji danych, które umożliwia automatyczne przetwarzanie, transformowanie oraz konwersję danych między różnymi formatami i systemami (w tym systemami wykorzystującymi cyfrowe dane geoprzestrzenne). Natomiast ArcGIS Pro to zaawansowane oprogramowanie GIS rozwijane przez firmę Esri, które oferuje szerokie możliwości analizy, wizualizacji oraz zarządzania danymi przestrzennymi. ArcGIS Pro umożliwia pracę z danymi 2D i 3D, integrację z bazami danych czy przeprowadzanie zaawansowanych analiz.

Dodatkowo wykorzystywano otwarte oprogramowanie takie jak QGIS (przede wszystkim do wizualizacji niektórych danych geoprzestrzennych), DBEaver do przeglądania i analizy baz danych, Blender z rozszerzeniem BlenderBIM (obecnie Bonsai) do analizy i wizualizacji plików IFC oraz Open IFC Viewer (wytwarzany przez Open Design Alliance) do wizualizacji plików IFC.

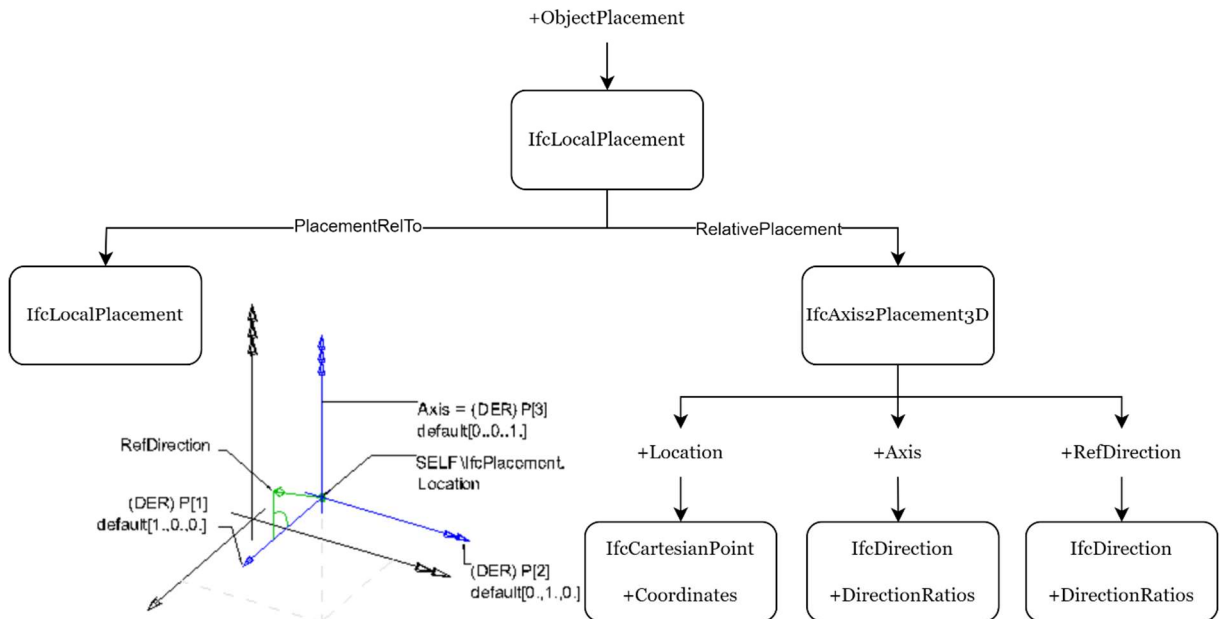
IV.4 Georeferencja w BIM

Georeferencja stanowi kluczowy element determinujący możliwość przeprowadzenia integracji cyfrowych danych budowlanych i geoprzestrzennych. Cyfrowe dane geoprzestrzenne z definicji są georeferencjonowane, co wynika ze stosowanych standardów. Natomiast dane BIM w formacie IFC, jak wcześniej opisano, nie zawsze zawierają informacje o georeferencji.

Georeferencja była już omawiana w odniesieniu do literatury w sekcji III.3.2.2. W tej części zostaną przeprowadzone badania z perspektywy technologicznej oraz szczegółowego opisu georeferencji w IFC i implikacji wynikających z różnych metod jej zapisu. Rozpatrując aspekt matematyczny georeferencji w kontekście cyfrowych danych budowlanych, badania przeprowadzone przez (Jaud i in., 2020) wskazują, że podczas realizacji prac projektowych i realizacyjnych należy zwrócić uwagę na kluczową rolę odpowiedniego odwzorowania, szczególnie w przypadku infrastrukturalnych projektów inwestycyjnych.

Schemat IFC umożliwia zdefiniowanie układów współrzędnych (w sensie geometrycznym) w wielu miejscach. Właściwie każdy komponent, dziedziczący po klasie *IfcProduct*, ma lub może mieć zdefiniowany własny układ współrzędnych. Podczas definicji umiejscowienia, określa się również relację względem innych układów np.

nadrzędnych (atrybut *PlacementRelTo*) (Rys. 24). Szczegółowiej aspekt ten będzie opisany w kolejnej sekcji. Z punktu widzenia georeferencji najważniejsza jest jednak właśnie możliwość zdefiniowania tego odniesienia.



Rysunek 24 Schemat dla klasy *IfcLocalPlacement* jako klasy umożliwiającej zdefiniowanie układu współrzędnych

Ponadto, georeferencja może być określona przez atrybuty definiujące różne informacje pozwalające na lokalizację modelu. W (Christian & Hendrik, 2019) wyodrębniono 5 poziomów georeferencji w nawiązaniu do IFC w wersji 4. Jednakże, wraz z rozwojem standardów, informacje te wymagają pewnych aktualizacji m.in. ze względu na publikację IFC w wersji 4x3, która to aktualizacja została po części wykonana w (Glinka i in., 2024).

W dalszej części niniejszej sekcji georeferencja zostanie opisana w bardziej szczegółowy sposób w odniesieniu zarówno do formatu IFC w wersji 4, jak i IFC 4x3, ponieważ stanowi to kluczowy aspekt w procesie integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych.

W ramach prac analizę rozpoczęto od klas umożliwiających zapis informacji o georeferencji. Wyodrębniono dwie podstawowe klasy: *IfcSite* oraz *IfcProject*. Klasa *IfcSite* daje możliwość georeferencji poprzez odniesienie do atrybutów. Atrybutami umożliwiającymi zawarcie informacji o georeferencji (*LoGeoRef10*) na najniższym poziomie jest odniesienie do adresu (atrybut *SiteAddress*) – klasa *IfcPostalAddress* dla IFC w wersji 4 lub w wersji 4x3 zestaw właściwości *Pset_Address*. Informacja ta umożliwia umiejscowienie modelu w przestrzeni z dokładnością do wskazania np. ulicy oraz numeru, na której znajduje się obiekt. Możliwe jest również przetworzenie tych danych na współrzędne geograficzne np. z wykorzystaniem metod geokodowania. Jednakże dla niektórych zastosowań, np. logistycznych, informacja ta może być wystarczająca. Z punktu widzenia informacji prawnych, możliwe jest również zawarcie informacji na temat identyfikatora prawnego (np. Na podstawie danych katastralnych), co również może posłużyć do przybliżonej lokalizacji obiektu. Zamodelowanie tej informacji jest możliwe przez dostarczenie odpowiednich parametrów do zdefiniowanego zestawu właściwości *Pset_LandRegistration* (tylko w IFC 4x3).

Kolejnymi atrybutami pozwalającymi na zlokalizowanie pliku w przestrzeni są atrybuty klasy *IfcSite* pozwalające na zdefiniowanie szerokości i długości geograficznych, a także wysokości elipsoidalnych w odniesieniu do elipsoidy WGS84 (*LoGeoRef20*). Są to odpowiednio atrybuty: *RefLatitude*, *RefLongitude* oraz *RefElevation* (wysokość elipsoidalna). Wartości dla szerokości oraz długości geograficznych są podawane z wykorzystaniem klasy *IfcCompoundPlaneAngleMeasure* w postaci listy składającej się z stopni, minut, sekund oraz opcjonalnie milionowych sekundy. W ramach struktury schematu nie jest zdefiniowane jakiego punktu modelu dotyczą powyższe współrzędne, jednak, co do zasady, powinny odnosić się do atrybutu *ObjectPlacement* klasy *IfcSite*.

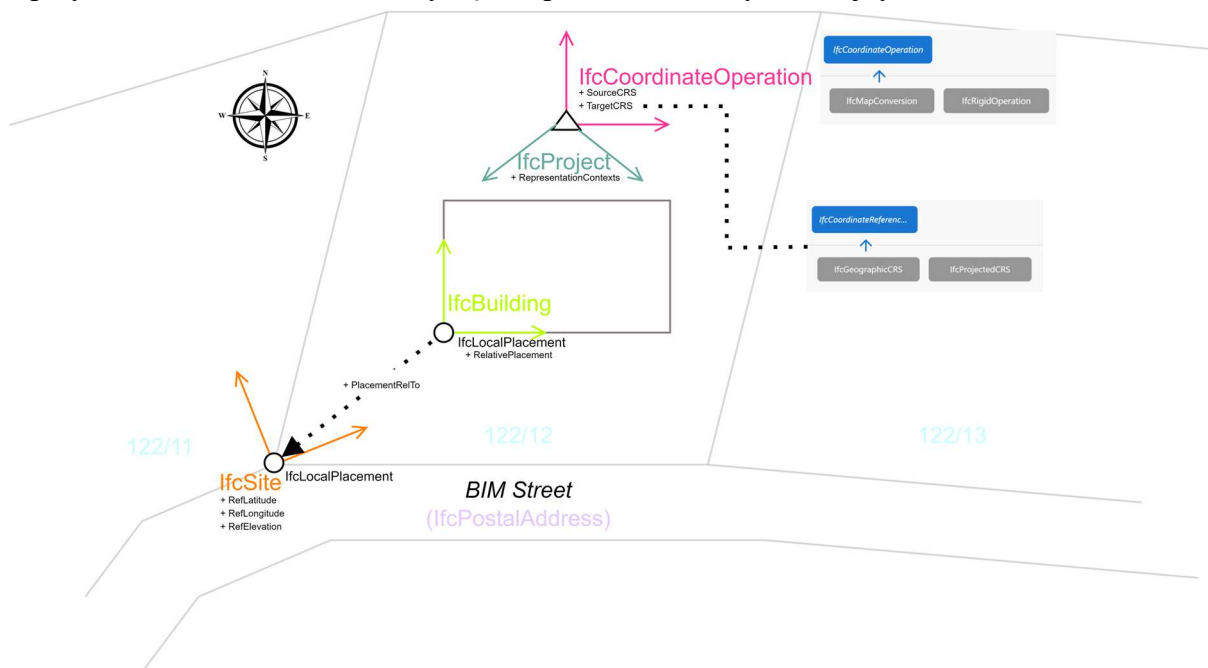
Wyższy poziom georeferencji (*LoGeoRef30*) odnosi się do opisywanego wcześniej przypadku zakotwiczenia układu współrzędnych poprzez atrybut *ObjectPlacement* klasy *IfcSite*. W ten sposób możliwe jest określenie najwyższego w relacji standardowej struktury przestrzennej, wśród obiektów dziedziczących po *IfcProduct*, układu współrzędnych. Jednakże brak jest możliwości zdefiniowania tego układu w postaci kodu EPSG czy też odniesienia wysokościowego. Dla tej klasy nie zostały przewidziane odpowiednie atrybuty. Z tego też powodu, w przypadku georeferencji na tym poziomie wymagane są informacje suplementarne np. w postaci dodatkowego pliku bądź zdefiniowanego zestawu właściwości.

Kolejny poziom georeferencji (*LoGeoRef40*) odnosi się do klasy *IfcProject*, a dokładniej rzecz ujmując do atrybutu *RepresentationContexts* i klasy *IfcGeometricRepresentationContext* pozwalającej na nadanie kontekstu przestrzennego całego projektu oraz zdefiniowanie układu współrzędnych poprzez: zakotwiczenie układu z wykorzystaniem atrybutu *WorldCoordinateSystem* (klasa *IfcAxis2Placement*) oraz zdefiniowanie kierunku *TrueNorth* (klasa *IfcDirection*). Jednakże po raz kolejny brak jest możliwości opisanego wykorzystanego układu współrzędnych.

Najwyższy poziom georeferencji (*LoGeoRef50*) również odnosi się do klasy *IfcProject* oraz atrybutu *RepresentationContexts*. Jednakże wiąże on (relacja *HasCoordinateOperation*) zdefiniowany tam układ (definiowany jako układ projektu - *SourceCRS*) z globalnym układem współrzędnych zdefiniowanym poprzez klasy dziedziczące po *IfcCoordinateOperation*: *IfcMapConversion* lub *IfcRigidOperation* (w IFC 4x3). Klasa *IfcMapConversion* daje możliwość translacji (atrybuty *Eastings*, *Northings* oraz *OrthogonalHeight*), obrotu (atrybuty *XAxisAbscissa* oraz *XAxisOrdinate*) oraz przeskalowania (również dla każdej osi osobno – *IfcMapConversionScaled* – IFC 4x3). W ten sposób możliwe są do obliczenia parametry transformacji z projektowego do globalnego układu współrzędnych. Co więcej, poprzez klasę *IfcMapConversionScaled*, możliwe jest zamodelowanie informacji o np. zniekształceniach, wynikających z przyjętego odwzorowania, co może mieć niebagatelne znaczenie w przypadku inwestycji infrastrukturalnych lub rozległych obszarowo. Klasa *IfcRigidOperation* umożliwi natomiast samą translację. Ponadto dla obu klas, poprzez atrybut *TargetCRS* opisywany jest wykorzystany układ współrzędnych z wykorzystaniem klas *IfcProjectedCRS* oraz *IfcGeographicCRS* (IFC 4x3), które dziedziczą po *IfcCoordinateReferenceSystem*. Atrybuty powyższych klas umożliwiają zapis informacji o zastosowanych układach współrzędnych (atrybut *Name* – kod EPSG) czy układów odniesienia (atrybuty *GeodeticDatum* oraz *VerticalDatum*). Możliwe jest również (dla IFC 4x3) zdefiniowanie niestandardowych układów poprzez relację *WellKnownText* i w formacie WKT poprzez klasę *IfcWellKnownText* opisanie układu współrzędnych.

Poniżej schematycznie przedstawiono poszczególne odniesienia (Rys. 25) oraz zebrano całość w sposób tabelaryczny (Tab. 7) w celu podsumowania niniejszej części.

Patrząc z punktu widzenia zarządczego, weryfikacja georeferencji jest więc jednym z kluczowych aspektów, dla realizacji różnych zadań związanych z koordynacją czy realizacją prac rozpatrujących model w odniesieniu geoprzestrzennym. Jest to również jeden z przykładów zastosowania, który będzie przeanalizowany w kolejnym rozdziale.



Rysunek 25 Georeferencja IFC – schematyczne przedstawienie klas, w których mogą być zawarte informacje o georeferencji w formacie IFC (Glinka i in., 2024)

Tabela 7 Tabelaryczne przedstawienie poziomów georeferencji wraz z uwzględnieniem aktualizacji w najnowszej wersji IFC 4x3. Opracowanie własne na podstawie (Glinka i in., 2024)

Poziom	Klasa (atrybut) /zestaw właściwości/	Szczegółowa klasa/atrybuty (dla IFC 4x3)
LoGeoRef10	IfcSite /Pset_Address/ /Pset_LandRegistration/	Georeferencja zapisana jako zestaw właściwości klasy IfcSite: a) poprzez zdefiniowanie adresu – Pset_Address b) poprzez relację do danych katastralnych o działce – Pset_LandRegistration.
LoGeoRef20	IfcSite (+RefLatitude, +RefLongitude, +RefElevation)	Atrybuty klasy IfcSite odniesione do elipsoidy WGS84 - długość i szerokość geograficzna podane w stopniach, minutach, sekundach oraz milionowych sekund oraz wysokość elipsoidalna.
LoGeoRef30	IfcSite (+ObjectPlacement)	Atrybut ObjectPlacement klasy IfcSite reprezentowany przez klasę IfcLocalPlacement definiujący umiejscowienie (atrybut RelativePlacement) układu współrzędnych (IfcAxis2Placement3D) poprzez zdefiniowanie punktu (Location) oraz obrotów (Axis -

		odchylenie względem osi z oraz RefDirection – kierunek układu współrzędnych).
LoGeoRef40	IfcProject (+RepresentationContexts)	Zdefiniowanie kontekstu reprezentacji geometrycznej poprzez atrybut RepresentationContexts klasy IfcProject reprezentującej typ IfcGeometricRepresentationContext umożliwiającego umiejscowienie układu współrzędnych (atrybut WorldCoordinateSystem) oraz obrotu względem północy (atrybut TrueNorth).
LoGeoRef50	IfcProject (+RepresentationContexts); IfcCoordinateOperation	Zdefiniowanie kontekstu reprezentacji geometrycznej poprzez atrybut RepresentationContexts klasy IfcProject definiowany przez klasę IfcGeometricRepresentationContext umożliwiającą umiejscowienie projektowego układu współrzędnych (atrybut WorldCoordinateSystem) oraz obrotu względem północy (atrybut TrueNorth). Powiązanie projektowego układu współrzędnych z globalnym poprzez klasę IfcCoordinateOperation reprezentowanej przez IfcRigidOperation (tylko translacja układu), bądź IfcMapConversion (pełna definicja parametrów transformacji afinicznej). Klasy te powiązują SourceCRS (reprezentowanej przez IfcGeometricRepresentationContext – projektowy układ współrzędnych) oraz TargetCRS. TargetCRS definiuje docelowy układ współrzędnych. Możliwe jest zdefiniowanie geograficznego układu współrzędnych (IfcGeographicCRS) lub odwzorowania (IfcProjectedCRS). Klasy te pozwalają na opis stosowanych układów poziomych (np. kod EPSG) oraz wysokościowych (Vertical Datum - np. geoida), a także inne parametry.

W celu pełnej integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych potrzebna jest precyzyjna wiedza na temat układu współrzędnych. Dlatego też właściwie jedynym możliwym poziomem, który spełnia te założenia jest najwyższy *LoGeoRef50*. Proponowane są jednak również rozwiązania, które pozwalają na zawarcie informacji o zastosowanym układzie współrzędnych w postaci suplementarnego pliku definiującego projekcję (plik *.prj*) w formacie WKT, co umożliwi przeprowadzenie procesu łączenia danych i obsługi różnych zadań wymagających od plików IFC posiadania informacji o georeferencji. W przypadku braku takowej informacji lub georeferencji na niższych poziomach, realizacja procesów związanych z integracją czy też łączeniem z cyfrowymi danymi geoprzestrzennymi jest bardzo utrudniona (poza zdefiniowanym wcześniej przypadkiem wykorzystania dla celów działań logistycznych).

IV.5 Reprezentacja geometryczna – charakterystyka standardów otwartych dla cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych

W celu poprawnej obsługi procesów integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych, przeprowadzono szczegółowe badania nad metodyką zapisu danych dotyczących geometrii w ramach standardów stosowanych dla cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych. Następnie przeprowadzono analizy w celu identyfikacji implikacji metod zapisu na konwersję pomiędzy domenami. Ponadto zaprezentowano opracowane w toku prac algorytmy umożliwiające na przejście pomiędzy zapisami geometrii w obu domenach.

W przypadku reprezentacji geometrycznej cyfrowych danych budowlanych w formacie IFC głównym problemem jest zagnieżdżenie informacji w postaci struktur semantycznych oraz przestrzennych. Odczytanie geometrii wymaga więc parsowania pliku oraz powiązania odpowiednich klas pomiędzy sobą. Ponadto możliwe są różne typy reprezentacji oraz identyfikatory, które umożliwiają stwierdzenie jakiej reprezentacji można się spodziewać (np. *footprint*, *body*, *axis*). Dzięki temu dany komponent może mieć kilka typów reprezentacji odnoszących się do różnych identyfikatorów. Reprezentacje może posiadać każdy element dziedziczący po klasie *IfcProduct*. Głównym więc wyzwaniem jest odczytanie tych zagnieżdżonych informacji (nierzadko opisanych w sposób parametryczny) oraz przekonwertowanie do jawnej reprezentacji, w zdefiniowanym układzie współrzędnych, najczęściej reprezentowanej z wykorzystaniem BRep (Boundary Representation). W przypadku reprezentacji z identyfikatorami typu *footprint*, odczyt reprezentacji jest nieco mniej skomplikowany i wymaga odczytu np. *polyline* i transformacji wynikającej z rozkładu przestrzennego (dziedziczenia przestrzennego) klas.

Jednakże, istnieją również specjalne typy reprezentacji, które wymagają nieco innego podejścia. Takimi reprezentacjami są osie obiektów infrastrukturalnych reprezentowane przez klasę *IfcAlignment*. Metoda ich odczytu jest nieco inna, aniżeli w przypadku pozostałych, ponieważ posiadają w swoim opisie niestandardowe krzywe.

Z drugiej strony należy również zwrócić uwagę na możliwości zapisu reprezentacji geometrycznych w domenie geoprzestrzennej. Tutaj również możliwa jest reprezentacja w postaci danych dwuwymiarowych oraz trójwymiarowych, jednakże wymagana jest najczęściej jawna reprezentacja. Szczegółowo problematykę tę opisuje standard ISO 19107 (ISO 19107:2019 - Geographic information — Spatial schema, 2019).

Powyżej opisane problemy zostały szczegółowo przeanalizowane w ramach toku prac w kolejnych podsekcjach wraz z wskazaniem możliwości technologicznych (implementacją) umożliwiającą łączenie i konwersję danych. Algorytmy te zostały następnie wykorzystane do przedstawienia przykładów zastosowania w kolejnym rozdziale oraz są podstawą elastycznego podejścia do integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych.

Elementem dodatkowym, wynikającym z metodyki prac w ramach stosowania BIM są poziomy szczegółowości geometrycznej (LOD), które są częścią standardów dotyczących opisu szczegółowości informacyjnej (LOIN). W przypadku geometrii, w celu obsługi danych procesów należy zidentyfikować oraz zdefiniować sposób w jaki dany element czy też obiekt

powinien być zamodelowany. W szczególności do zdefiniowania są takie informacji jak szczegółowość, wymiarowość, lokalizacja, wygląd oraz zachowanie parametryczne (ISO 7817-1:2024 Building information modelling — Level of information need Part 1: Concepts and principles, 2024).

IV.5.1 IFC - reprezentacja CSG, BRep, SweptSolid

A. Rodzaje reprezentacji trójwymiarowej w strukturze IFC

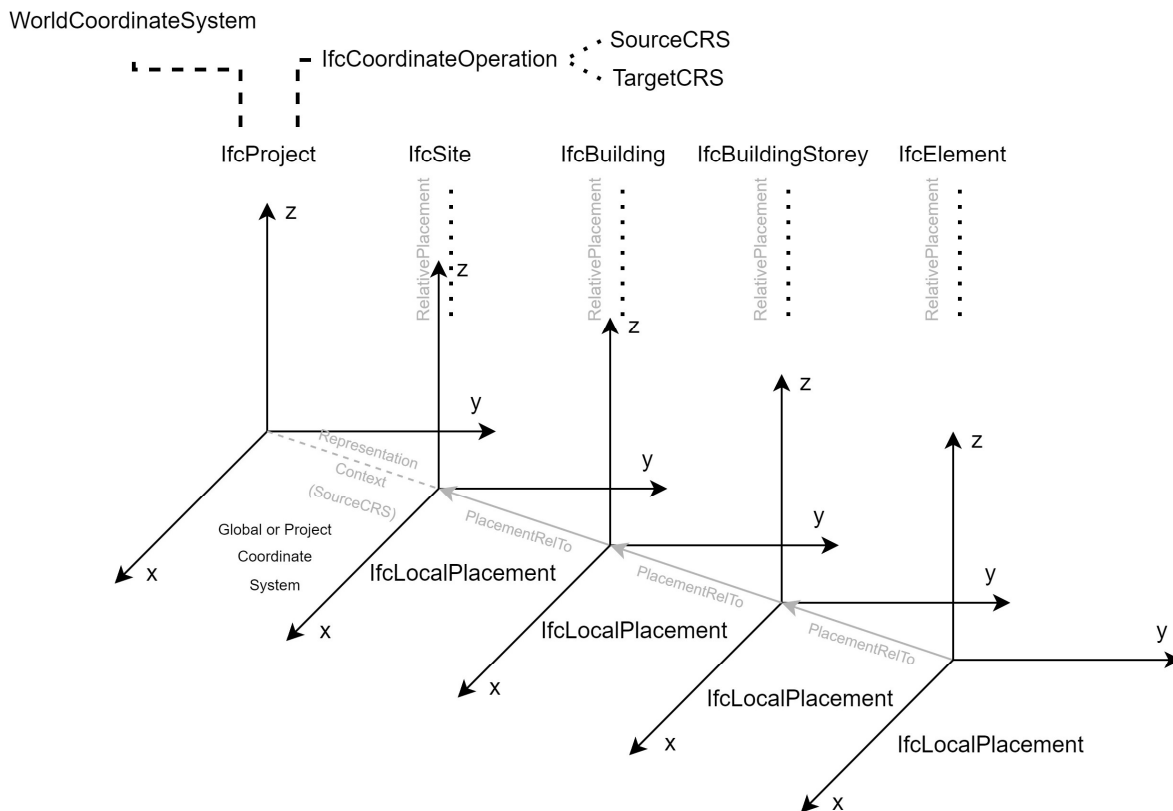
Analizując kwestię podstawowej reprezentacji oraz umiejscowienia komponentu w układzie modelu, należy zwrócić uwagę na dwie podstawowe kwestie: możliwość, rodzaje i typy reprezentacji danych (atrybut *Representation*) oraz umieszczenie i sparametryzowanie układu współrzędnych komponentu (atrybut *ObjectPlacement*), a także zdefiniowania relacji z nadrzędnymi układami współrzędnych (odwrotny atrybut *PositionedRelativeTo*). Wszystkie te informacje mogą być zawarte w klasach dziedziczących po *IfcProduct*. Należy jednak zaznaczyć, że nie każda klasa musi mieć reprezentację geometryczną.

Rozpoczynając od umiejscowienia komponentu, atrybut *ObjectPlacement* jest opisywany przez klasę *IfcObjectPlacement*, po której dziedziczą:

- *IfcGridPlacement* - umiejscowienie definiowane jest przez umieszczeniu układu współrzędnych poprzez odniesienie do siatki (*IfcGrid*)
- *IfcLinearPlacement* – umiejscowienie definiowane jest przez umieszczeniu układu współrzędnych poprzez odniesienie do krzywej (*IfcAxis2PlacementLinear*)
- *IfcLocalPlacement* – umiejscowienie definiowane jest przez umieszczenie układu współrzędnych w zdefiniowanym punkcie, zdefiniowanej orientacji układu oraz odchyleniu od osi pionowej (*IfcAxis2Placement2D* lub *IfcAxis2Placement3D*)

Sama klasa *IfcObjectPlacement* jako atrybut posiada odniesienie do nadrzędnego układu współrzędnych (atrybut *PlacementRelTo*) oraz atrybut umiejscowienia układu współrzędnych (atrybut *RelativePlacement*) (Rys. 24). Model opisujący zależność pomiędzy układami to transformacja afiniczna, bez uwzględniania skali.

Analizując samą charakterystykę przestrzenną oraz odniesienia pomiędzy układami, w ramach schematu IFC zaimplementowana jest struktura układów (*IfcSpatialStructureElement*). Pomędzy poszczególnymi układami następuje, w przypadku wykorzystania klasy *IfcLocalPlacement*, transformacja afiniczna zawierająca translację oraz obroty względem każdej z osi. Poniżej została schematycznie przedstawiona omówiona powyżej struktura (Rys. 26). Ponadto zawarta jest informacja o relacji pomiędzy klasą *IfcSite* oraz *IfcProject*, która jest opisana nieco inną relacją (kontekst przestrzenny). Jednakże w celu przejście od układu komponentu (*IfcElement*) do globalnego układu współrzędnych (najwyższy poziom georeferencji) należy przeprowadzić szereg transformacji, w tym również opisaną przez kontekst.

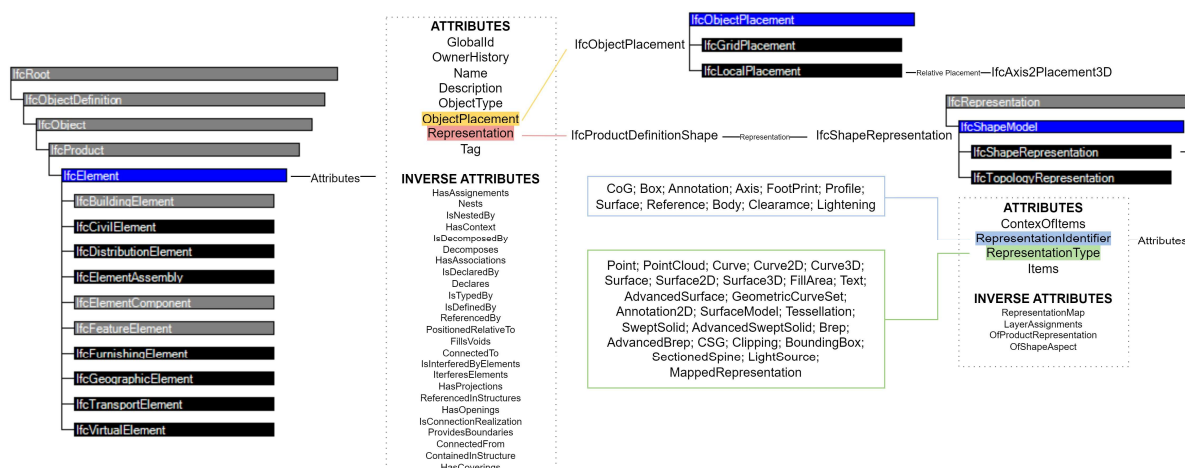


Rysunek 26 Domyślna (główna) relacja przestrzenna pomiędzy układami współrzędnych w formacie IFC (Glinka i in., 2024)

Dla celów modelowania obiektów infrastrukturalnych, zmodyfikowano nieco podejście do struktury przestrzennej, co wynika z odmiennej charakterystyki przestrzennej niż w przypadku obiektów kubaturowych. Do definiowania relacji przestrzennej wykorzystywana jest klasa *IfcRelContainedInSpatialStructure* odnosząca się do odpowiednich klas domenowych np. *IfcBridge* czy *IfcRoad* i definiująca strukturę podziału przestrzennego np. *IfcBridgePart* czy *IfcRoadPart*.

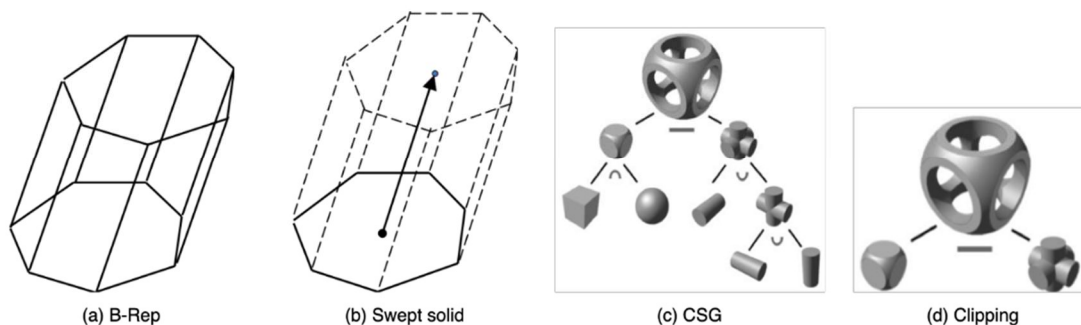
Kolejną kwestią istotną z punktu widzenia konwersji z reprezentacji zagnieżdżonej do jawnej jest kwestia samego opisu reprezentacji oraz typów. Schemat IFC wyróżnia szereg możliwych do zastosowania rodzajów reprezentacji, które mogą odwoływać się do różnych kontekstów. Analizując strukturę, reprezentacja jest zapisywana przez atrybut *Representation*, który jest dziedziczony po klasie *IfcProduct*. Następnie poprzez klasę *IfcProductDefinitionShape* oraz atrybut *Representations* definiowane są różne typy reprezentacji w odniesieniu do kontekstu. Atrybut ten odwołuje się znowu do klasy *IfcShapeRepresentation*, gdzie odbywa się już szczegółowe odniesienie do klas reprezentacji (*Items*). Klasa ta posiada również kontekst (*ContextOfItems*) identyfikatory (*Identifier*) reprezentacji oraz typy (*RepresentationType*). W dalszej części uwaga zostanie poświęcona różnym metodą reprezentacji geometrii (*IfcGeometricRepresentationItem*), wraz

z implikacją na możliwości konwersji do postaci jawnej. Poniżej został przedstawiony schemat relacji zapisu informacji o reprezentacji (Rys. 27).



Rysunek 27 Schemat klasy IfcElement w odniesieniu do możliwości reprezentacji (Glinka i in., 2024)

Rozpatrując modele trójwymiarowe, głównymi metodami zapisu i parametryzacji geometrii w strukturze IFC są trzy typy geometrii: CSG (Constructive Solid Geometry), BRep (Boundary Representation) oraz SweptSolid (SS) (Rys. 28). Mogą być one realizowane przez różne klasy IFC, co jest w głównej mierze uzależnione stopniem skomplikowania bryły czy komponentu.



Rysunek 28 Metody zapisu geometrii trójwymiarowej (Zhu i in., 2020)

Constructive Solid Geometry polega na działaniach logicznych na bryłach w celu ich połączenia, identyfikacji różnicy czy części wspólnej. W schemacie IFC tego typu bryły mogą być reprezentowane przez klasy dziedziczone po *IfcCsgPrimitive3D* (np. *IfcBlock*), ale też możliwe jest połączenie z innymi metodami reprezentacji (np. *SweptSolid*) i wytworzenie bryły *IfcCsgSolid*. Same operacje logiczne odbywają się poprzez klasę *IfcBooleanResult*, gdzie pierwszy z atrybutów definiuje rodzaj operacji (*DIFFERENCE*, *INTERSECTION*, *UNION*). Przykładowy wycinek pliku IFC przedstawiający powyżej przedstawione operacje został zaprezentowany poniżej (Rys. 29).

Patrząc z punktu widzenia konwersji do postaci jawnej, przetworzenie wymaga przejścia z parametrycznego zapisu do odczytania wierzchołków, z których składa się dany komponent oraz, w przypadku skomplikowanych kształtów np. kulistych, przepróbowania do reprezentacji np. w postaci siatki trójkątów.

```

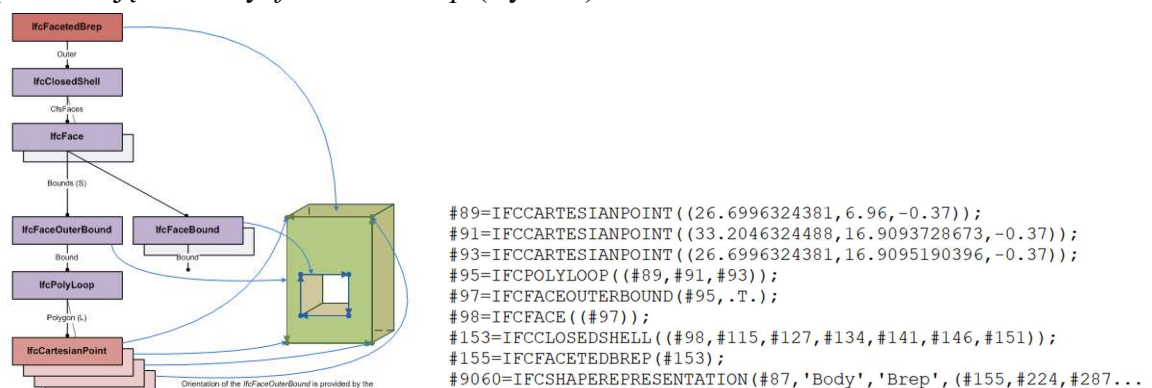
#200= IFCBLOCK(#201,2000.0,800.0,800.0);
#201= IFCAXIS2PLACEMENT3D(#2,$,$);
#202= IFCROUNDEDRECTANGLEPROFILEDEF(.AREA.,'VoidProfile',$,1800.0,600.0,200.0);
#203= IFCAXIS2PLACEMENT3D(#204,$,$);
#204= IFCARTESIANPOINT((1000.0,400.0,100.0));
#205= IFCDIRECTION((0.0,0.0,1.0));
#206= IFCEXTRUDEDAREASOLID(#202,#203,#205,700.0);
#207= IFCBOOLEANRESULT(.DIFFERENCE.,#200,#206);
#208= IFCCSGSOLID(#207);
#209= IFCREPRESENTATIONMAP(#210,#211);
#210= IFCAXIS2PLACEMENT3D(#2,$,$);
#211= IFCSHAPEREPRESENTATION(#5,'Body','SolidModel',(#208));

```

Rysunek 29 Przykład zapisu CSG w pliku IFC (buildingSMART, 2024f)

BRep to metoda zapisu geometrii w sposób jawny, jednakże w układzie komponentu w ramach IFC. Oznacza to, że każdy wierzchołek ma z góry przypisane współrzędne lub jest zaindeksowany, brak jest zapisu parametrycznego. Z punktu widzenia konwersji, jest to więc najlepsza metoda zapisu geometrii, ponieważ wymagane jest tylko przeprowadzenie procesu transformacji z uwagi na strukturę przestrzenną. W ramach schematu IFC, ten typ reprezentacji może być realizowany przez reprezentację w postaci płaszczyzn czy siatki trójkątów – klasy dziedziczące po klasie *IfcManifoldSolidBrep* (*IfcFacetedBrep* czy *IfcAdvancedBrep*) czy *IfcTessellatedItem* (*IfcPolygonalFaceSet* czy *IfcTriangulatedFaceSet*).

W przypadku klas dziedziczących po *IfcManifoldSolidBrep*, ideą jest dostarczenie odpowiednich składowych w postaci poszczególnych powierzchni z których składa się obiekt – atrybut *Outer* reprezentowany przez klasę *IfcClosedShell*, dla którego może być przypisanych wiele *IfcFace*. W przypadku klasy *IfcFacetedBrep*, reprezentacja odbywa się poprzez *IfcPolyLoop*, czyli proste zdefiniowanie płaszczyzn z wykorzystaniem trójwymiarowych poligonów oraz *IfcFaceOuterBound*. Z drugiej strony, w przypadku *IfcAdvancedBrep* definiuje się składowe dla bardziej skomplikowanych elementów na bazie bardziej zaawansowanych relacji topologicznych w ramach klasy *IfcEdgeCurve*. Poniżej zaprezentowany przykładową reprezentację dla klasy *IfcFacetedBrep* (Rys. 30).



Rysunek 30 *IfcFacetedBrep* - przykład obrazujący metodę reprezentacji. Po lewej schematyczna prezentacja (buildingSMART, 2024b), po prawej reprezentacja zapisana w pliku IFC.

W przypadku modelowania informacji geometrycznej z wykorzystaniem *IfcTessellatedItem* (np. *IfcPolygonalFaceSet*), reprezentacja jest zapisana poprzez stworzenie listy współrzędnych (*IfcCartesianPointList3D*), a następnie poprzez atrybut *Faces*, odwołanie do opisu poszczególnych płaszczyzn z wykorzystaniem indeksów odnoszących się do listy współrzędnych z wykorzystaniem *IfcIndexedPolygonalFace* (Rys. 31).

```

#395=IFCINDEXEDPOLYGONALFACE((1,2,3,4,5,6,7,8));
#396=IFCINDEXEDPOLYGONALFACE((9,10,11,12,13,14,15,16));
#397=IFCINDEXEDPOLYGONALFACE((3,16,15,4));
#398=IFCINDEXEDPOLYGONALFACE((2,1,10,9));
#399=IFCINDEXEDPOLYGONALFACE((3,2,9,16));
#400=IFCINDEXEDPOLYGONALFACE((1,8,11,10));
#401=IFCINDEXEDPOLYGONALFACE((6,13,12,7));
#402=IFCINDEXEDPOLYGONALFACE((13,6,5,14));
#403=IFCINDEXEDPOLYGONALFACE((14,5,4,15));
#404=IFCINDEXEDPOLYGONALFACE((11,8,7,12));
#405=IFCCARTESIANPOINTLIST3D(((299.9999999999999, -8.999999999999951, 400.), (0., -8.999999999999929, 400.))
#406=IFCPOLYGONALFACESET(#405, .T., (#395, #396, #397, #398, #399, #400, #401, #402, #403, #404), $);
#409=IFCSHAPEREPRESENTATION(#89, 'Body', 'Tessellation', (#406));

```

Rysunek 31 Przykład reprezentacji *IfcTesselatedItem* w ramach struktury IFC

Odczytanie jawnej geometrii wymaga więc, dodatkowego kroku w celu odczytania na podstawie indeksów, poszczególnych współrzędnych, z których składa się dana powierzchnia. Jednak operacje te powinny zapewniać poprawność topologiczną.

Ostatni z omawianych typów trójwymiarowej geometrii występujących w ramach struktury IFC jest *SweptSolid*. Wydaje się, że jest to najczęściej spotykana metoda reprezentacji geometrii. Opiera się ona na zdefiniowaniu profilu, a następnie wyciągnięciu w zdefiniowanym kierunku, o zdefiniowaną długość (*IfcExtrudedAreaSolid*) lub wzdłuż krzywej (*IfcDirectrixCurveSweptAreaSolid* czy *IfcSweptDiskSolid*). Ponadto istnieje możliwość zapisu wielu profili czy przekrojów zmieniających się wzdłuż krzywej (*IfcSectionedSolidHorizontal*).

Wybór odpowiedniej metody reprezentacji zależy od obiektu, który jest modelowany. Klasa *IfcSweptDiskSolid* będzie najlepsza dla odwzorowania Sieci Uzbrojenia Terenu czy też instalacji w budynku, natomiast *IfcSectionedSolidHorizontal* jest najczęściej wykorzystywana do modelowania informacji o infrastrukturze drogowej czy kolejowej.

W przypadku definiowania profili, mogą one mieć właściwie dowolny kształt. Są one definiowane poprzez klasy dziedziczące po klasie *IfcProfileDef*. Natomiast krzywa jest najczęściej definiowana przez klasy dziedziczące po klasie *IfcCurve*.

Analizując, według autora, najbardziej ze skomplikowanych metod SS – *IfcSectionedSolidHorizontal*, geometria jest reprezentowana przez trzy atrybuty: krzywą - *Directrix* (np. oś obiektu infrastrukturalne), przekroje – *CrossSections* (definiowane z wykorzystaniem *IfcProfileDef*) oraz pozycje przekrojów *CrossSectionPositions* (definiowane w odniesieniu do krzywej poprzez *IfcLinearPlacement*) (Rys. 32).

```

#159876 = IFCGRADIENTCURVE((#159877, #159890, #159903, #159916, #159929), .F., #159751, #159945);
#160552 = IFCSHAPEREPRESENTATION(#17, 'Body', 'AdvancedSweptSolid', (#160536));
#160536 = IFCSECTIONEDSOLIDHORIZONTAL(#159876, (#160538, #160543), (#160548, #160550));
#160538 = IFCDERIVEDPROFILEDEF(.AREA., $, #159274, #160539, $);
#160543 = IFCDERIVEDPROFILEDEF(.AREA., $, #159277, #160544, $);
#160548 = IFCAXIS2PLACEMENTLINEAR(#160549, $, $);
#160550 = IFCAXIS2PLACEMENTLINEAR(#160551, $, $);
#159274 = IFCARBITRARYCLOSEDPROFILEDEF(.AREA., 'Reinforced Concrete Slab 01', #159275);
#159275 = IFCINDEXEDPOLYCURVE(#159276, (IFCLINEINDEX((1, 2)), IFCLINEINDEX((2, 3))...
#159276 = IFCCARTESIANPOINTLIST2D(((4.E-1, 0.), (4.E-1, 5.E-2), (2.1, 5.E-2), (2.1, 0.)...

```

Rysunek 32 Przykład reprezentacji *IfcSectionedSolidHorizontal* w ramach struktury IFC

Rozpatrując proces konwersji do reprezentacji jawnej, ostatnia z opisywanych metod reprezentacji jest najtrudniejsza, ponieważ ma najbardziej zagnieżdżoną reprezentację, co wymaga wielu kroków oraz operacji w celu uzyskania reprezentacji jawnej np. w postaci siatki trójkątów.

Opisane powyżej metody reprezentacji w ramach struktury IFC to najczęściej występujące na podstawie zebranych plików testowych. Ponadto istnieje jeszcze wiele innych

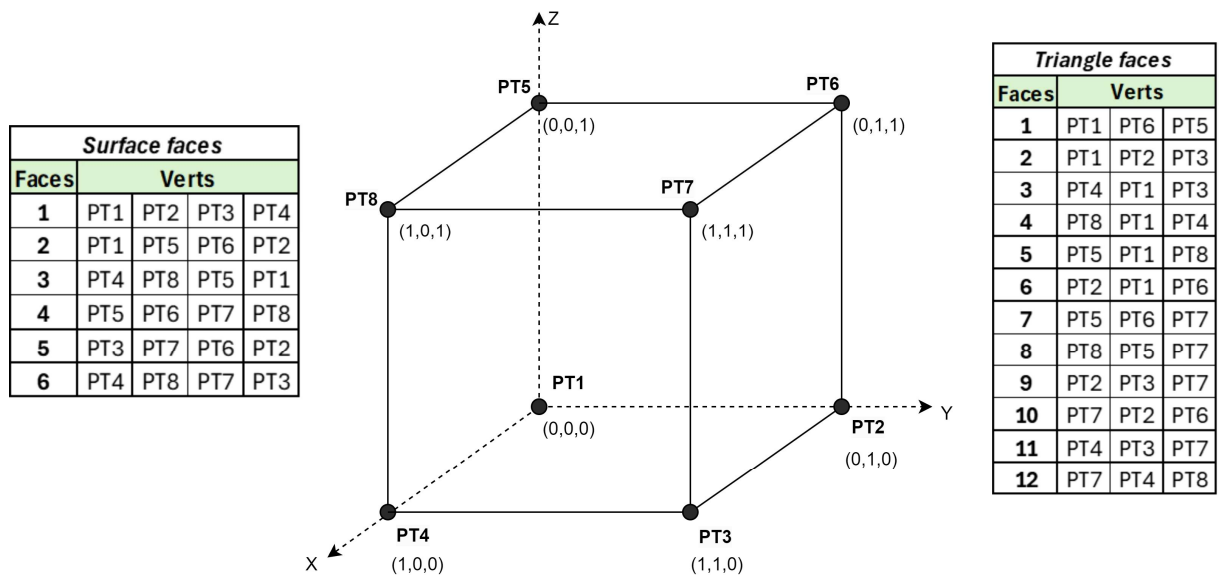
metod, jednakże są one wykorzystywane na potrzeby bardziej specjalistyczne np. modelowanie charakterystyki fizycznej.

B. Algorytm przejścia z reprezentacji jawnej do zagnieżdżonej

W ramach opracowanego algorytmu w (Glinka i in., 2024) zaproponowano kilka metod transformacji geometrii z zagnieżdżonej w jawną w oparciu o bibliotekę ifcopenshell oraz python-occ (silnik geometryczny OpenCascade). W niniejszej pracy algorytmy zostały rozszerzone o możliwości odczytu reprezentacji jawnej również dla obiektów infrastrukturalnych.

Podczas parsowania pliku, biblioteka *ifcopenshell* umożliwia odczytanie danych geometrycznych. Możliwe jest odczytanie geometrii bezpośrednio do postaci powierzchni złożonych z trójkątów lub klasy OpenCascade typu *TopoDS_Compound*, która następnie może być przetwarzana w celu ekstrakcji bardziej złożonych struktur.

W ramach opracowanego algorytmu zaproponowano przejście do dwóch typów reprezentacji geometrii jawnej: bazującej na trójkątach oraz bazującej na poligonach przedstawiających płaszczyzny. Dla przykładu poniżej został zamieszczony rysunek obrazujący różnice w podejściu do odczytywanej reprezentacji jawnej (Rys. 33).



Rysunek 33 Zaimplementowane metody reprezentacji jawnej (Glinka i in., 2024)

Dla reprezentacji z wykorzystaniem trójkątów poniżej zaprezentowano pseudokod obrazujący opracowany algorytm (Tab. 8).

Tabela 8 Algorytm konwersji do jawnej reprezentacji z wykorzystaniem trójkątów na bazie biblioteki ifcopenshell.

Algorytm 1: Konwersja do jawnej reprezentacji w postaci powierzchni składającej się z trójkątów

- 1: iterator ← zainicjalizuj iterator po klasach pliku IFC (ifcopenshell)
- 2: lista_geometrii ← stwórz pustą listę, do której będzie dodawana geometria
- 3: **dopóki** iterator ma obiekty wykonuj:
- 4: obiekt_geometria ← wczytaj geometrię obiektu
- 5: wierzchołki(obiekt_geometria) ← odczytaj wierzchołki, z których składa się geometria
- 6: indeksy(obiekt_geometria) ← odczytaj indeksy, z których składają się poszczególne powierzchnie
- 7: przetwórz wymiarowość obu obiektów

```

8:   trójkąty ← stwórz pustą listę, do której będą dodawane trójkąty
9:   dla każdej zindeksowanej_powierzchni w indeksach wykonaj:
10:   trójkąt ← stwórz pustą listę, do której będą dodawane wierzchołki
11:   dla i od 0 do 2 wykonaj:
12:     dodaj wierzchołek indeksy[zindeksowanej_powierzchni[i]] do trójkąta
13:   dodaj trójkąt do trójkątów
14:   dodaj trójkąty do lista_geometrii
15:   zwróć lista_geometrii

```

Dla drugiego typu reprezentacji postanowiono wykorzystać klasę *TopoDS_Compound*, na podstawie, której możliwa jest iteracja po płaszczyznach, sekwencjach krawędzi oraz punktach. W przypadku większej liczby niż jedna sekwencja krawędzi dla płaszczyzn, oznacza to, że dana płaszczyzna ma otwory. Dla tego celu wykorzystano metodę zapisu poligonów, w której podawane są dwie listy: pierwsza z główną definicją elementu (punktów) oraz druga z listą poligonów wycinających. Poniżej zaprezentowano pseudokod (Tab. 9).

Tabela 9 Algorytm konwersji do jawnej reprezentacji z większą liczbą wierzchołków na bazie biblioteki ifcopenshell oraz OpenCascade.

Algorytm 2: Konwersja do jawnej reprezentacji w postaci płaszczyzn z większą liczbą wierzchołków

```

1:   iterator ← zainicjalizuj iterator po klasach pliku IFC (ifcopenshell)
2:   lista_geometrii ← stwórz pustą listę, do której będzie dodawana geometria
3:   dopóki iterator ma obiekty wykonuj:
4:     obiekt_geometria ← wczytaj geometrię obiektu
5:     geometria_jawna ← stwórz pustą listę dla celów zapisu geometrii jawnej
6:     płaszczyzny ← odczytaj płaszczyzny obiektu w OpenCascade
7:     dopóki istnieją płaszczyzny wykonuj:
8:       sekwencje_krawędzi ← odczytaj sekwencje krawędzi pojedynczej płaszczyzny
9:       sekwencje_jawne ← stwórz pustą listę dla sekwencji jawnej
10:      dopóki istnieją sekwencje_krawędzi wykonuj:
11:        punkty_krawędzi ← odczytaj punkty sekwencji krawędzi
12:        punkty_jawne ← stwórz pustą listę dla punktów, z których składa się krawędź
13:        dopóki istnieją punkty sekwencji_krawędzi wykonuj:
14:          dodaj punkty do listy punkty_jawne
15:          jeśli długość listy punkty_jawne jest większa niż 2:
16:            dodaj punkty jako listę do sekwencje_jawne
17:          jeśli długość sekwencje_jawne jest równa 1:
18:            zrób poligon z punktów sekwencje_jawne i dodaj do geometria_jawna
19:          jeśli długość sekwencje_jawne jest większa od 1:
20:            zrób poligon z podziałem na część główną oraz wycinającą i dodaj do geometria_jawna
21:      dodaj lista geometria_jawna do lista_geometrii
22:   zwróć lista_geometrii

```

IV.5.2 IFC - reprezentacja powiązana z osią obiektu infrastrukturalnego

W przypadku danych dotyczących infrastruktury, najważniejszymi elementami reprezentacji jest najczęściej oś obiektu kolejowego, mostu czy też drogi. W ramach najnowszej wersji IFC 4x3 istnieje możliwość zapisu informacji o osi z wykorzystaniem klasy *IfcAlignment* oraz klas do niej nawiązujących.

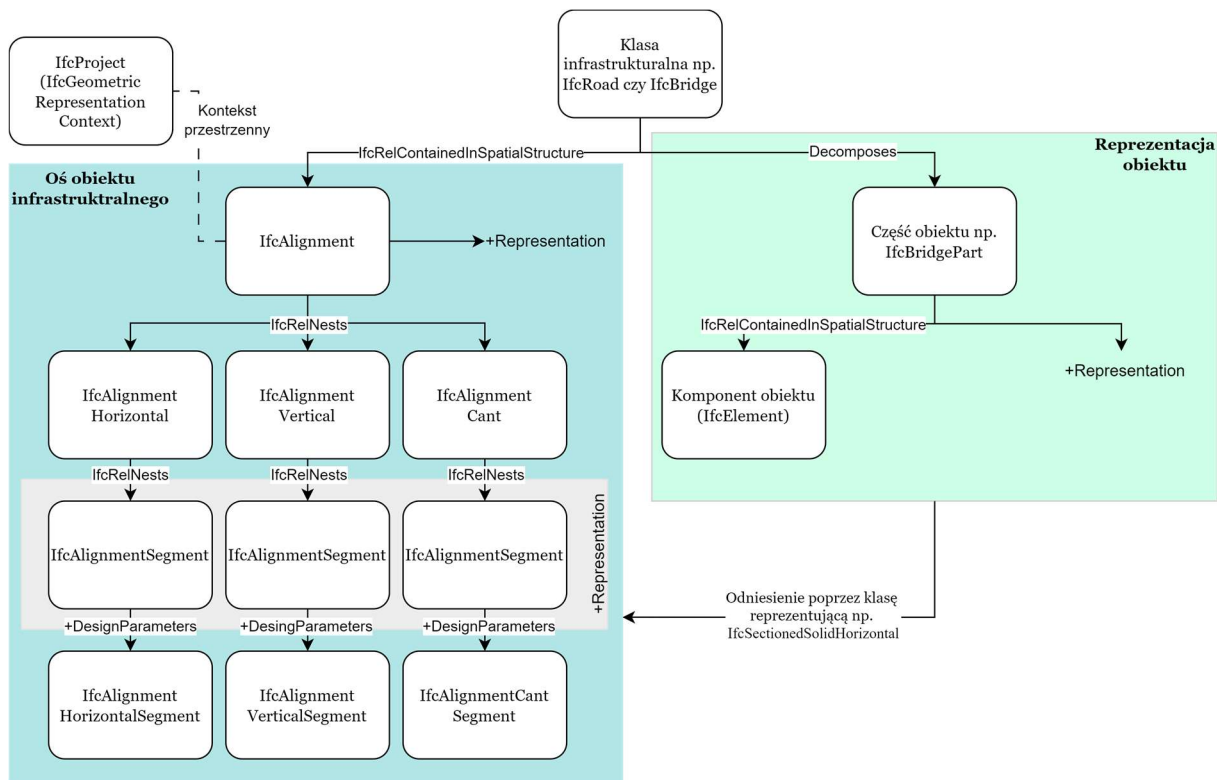
W ramach niniejszej sekcji zbadano szczegółowo ten typ reprezentacji oraz przedstawiono wypracowaną w ramach prac metodykę konwersji osi obiektów infrastrukturalnych do formatów wykorzystywanych w systemach wykorzystujących cyfrowe dane geoprzestrzenne. Wypracowane rozwiązania zostaną następnie wykorzystane

do przedstawienia różnorodnych przykładów zastosowania integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych w rozdziale V.

Klasa *IfcAlignment* jest najczęściej stricte powiązana z klasą przedstawiającą infrastrukturę (np. *IfcRoad*) w relacji *IfcRelContainedInSpatialStructure* (atrybut odwrotny *ContainsElements*). Klasa *IfcAlignment* może mieć reprezentację (atrybut *Representation*) w postaci złożenia krzywych np. horyzontalnej oraz wertykalnej. Jednakże parametry projektowe są zagnieżdżone nieco niżej w strukturze, poprzez odpowiednio klasy: dla opisu osi horyzontalnej – *IfcAlignmentHorizontal*; dla opisu osi wertykalnej – *IfcAlignmentVertical* oraz dla opisu przechyłek – *IfcAlignmentCant*, gdzie znowu poprzez zagnieżdżenie zamodelowana może być informacja o poszczególnych segmentach z wykorzystaniem klasy *IfcAlignmentSegment*. Klasa ta może posiadać również odniesienie do reprezentacji (atrybut *Representation*), natomiast parametry projektowe są przechowywane przez atrybut *DesignParameters*, który może być reprezentowany przez klasy, odpowiednio: *IfcAlignmentHorizontalSegment*, *IfcAlignmentVerticalSegment* oraz *IfcAlignmentCantSegment* (Rys. 34) (Tab. 10).

Kluczowym zadaniem jest więc odczytanie informacji na temat reprezentacji poszczególnych segmentów lub parametrów projektowych segmentów w celu odtworzenia osi w postaci informacji jawnej. Postać jawna w tym przypadku rozumiana jest przez zapis informacji geometrycznej na temat osi obiektu infrastrukturalnego z wykorzystaniem punktów znajdujących się na osi ze zdefiniowanym próbkowaniem.

Ponadto, rozpatrując aspekt przestrzenny, klasa *IfcAlignment* odnosi się bezpośrednio do kontekstu geometrii *IfcProject*, więc w przypadku zidentyfikowania najwyższego poziomu georeferencji należy przetransformować dane z wykorzystaniem klas dziedziczących po klasie *IfcCoordinateOperation* (np. *IfcRigidOperation* lub *IfcMapConversion*) w celu uzyskania reprezentacji w odpowiednim układzie współrzędnych.



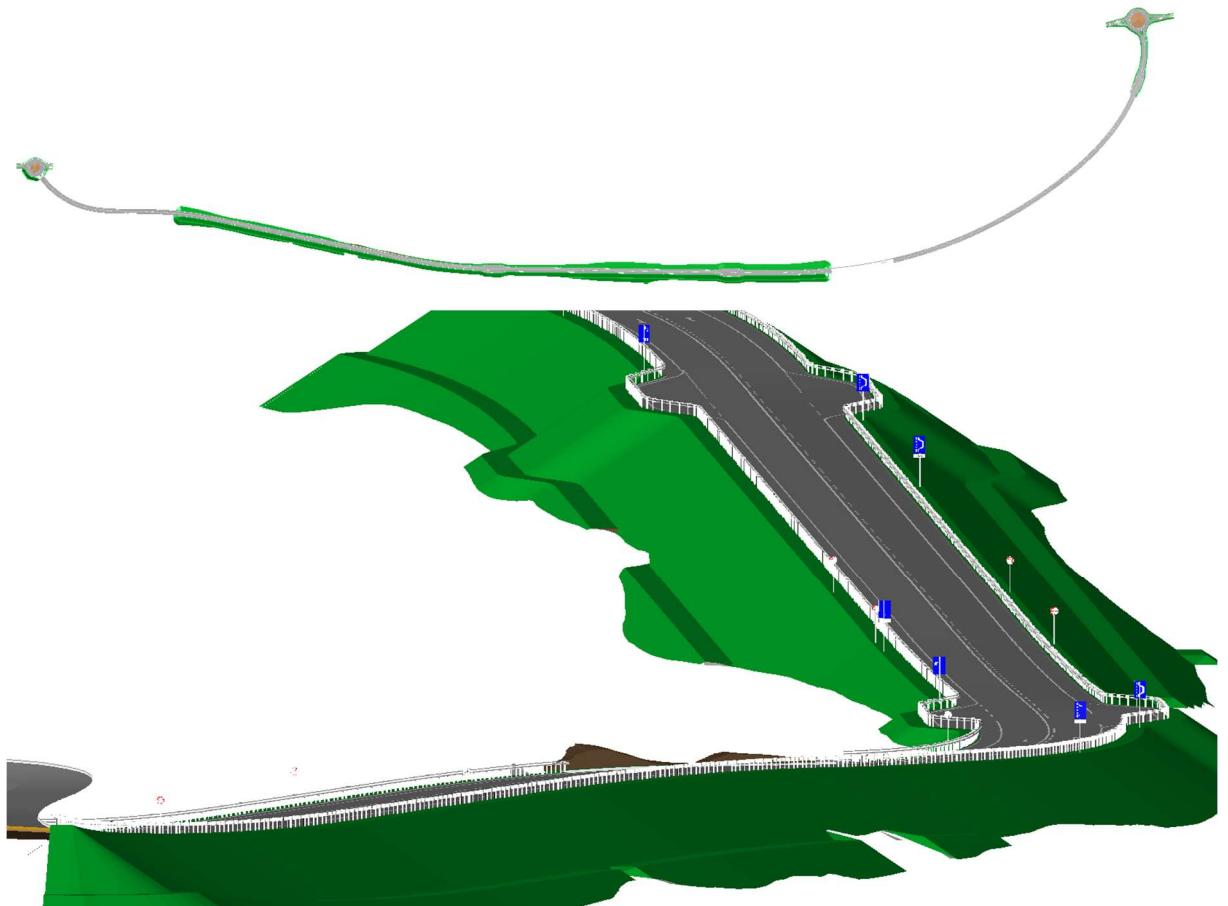
Rysunek 34 Schemat zapisu informacji o infrastrukturze w ramach schematu IFC

Tabela 10 Możliwe typy zapisu krzywych/przechyłek zaimplementowane w IFC 4X3

Klasa	Możliwe typy krzywych/przechyłek
IfcAlignmentHorizontalSegment	BLOSSCURVE, CIRCULARARC, CLOTHOID, COSINECURVE, CUBIC, HELMERTCURVE, LINE, SINECURVE, VIENNESEBEND
IfcAlignemntVerticalSegment	CIRCULARARC, CLOTHOID, CONSTANTGRADIENT, PARABOLICARC
IfcAlignmentCantSegment	BLOSSCURVE, CONSTANTCANT, COSINECURVE, HELMERTCURVE, LINEARTRANSITION, SINECURVE, VIENNESEBEND

Patrząc z punktu widzenia stosowanych do tej pory rozwiązań typu CAD, wykorzystanie i zamodelowanie informacji o osi obiektu infrastrukturalnego w oparciu o schemat IFC jest zdecydowanie bardziej efektywne. Wynika to z semantycznego podejścia, które pozwala w zdecydowanie łatwiejszy sposób automatyzować część prac. Dotyczy to również odczytu przebiegu osi obiektu infrastrukturalnego.

W celu lepszego zwizualizowania problemu, poniżej został przedstawiony oraz przeanalizowany realny przykład. Do tego celu został wykorzystany plik testowy przygotowany przez organizację buildingSmart Italy (buildingSMART, 2024d) udostępniony dla celów testów oprogramowania (Rys. 35).



Rysunek 35 Plik testowy dla celów weryfikacji algorytmów związanych z analizą *IfcAlignment*. U góry, widok modelu z 'lotu ptaka', na dole zbliżenie na model (buildingSMART, 2024d).

Plik posiada w swojej strukturze osie dla kilku obiektów infrastruktury drogowej. Szczegółowo zostanie przeanalizowany jeden obiekt składający się z 19 krzywych.

W ramach prac opracowano i zaimplementowano algorytm na bazie schematu na Rys. 33 składający się z kilku kroków opisanych poniżej na przykładzie modelu testowego. Rozpoczęto od wczytania pliku IFC oraz wyodrębnienia klasy *IfcAlignment*. Następnie wybrano definicję osi dla zdefiniowanego obiektu oraz poprzez odwołanie do zagnieżdżenia wybrano reprezentację horyzontalną osi (*IfcAlignmentHorizontal*). Następnie znowu poprzez relację zagnieżdżenia odczytano parametry poszczególnych segmentów (krzywych). W ten sposób otrzymano klasy *IfcAlignmentSegment* posiadające atrybut *DesignParameters* reprezentowany przez klasę *IfcAlignmentHorizontalSegment*, dzięki czemu otrzymano parametry każdej z krzywych, co umożliwia konwersję do reprezentacji jawnej dla każdej z zamodelowanych w ramach pliku krzywych. Atrybuty klasy *IfcAlignmentHorizontalSegment* umożliwiają zapis następujących parametrów krzywych:

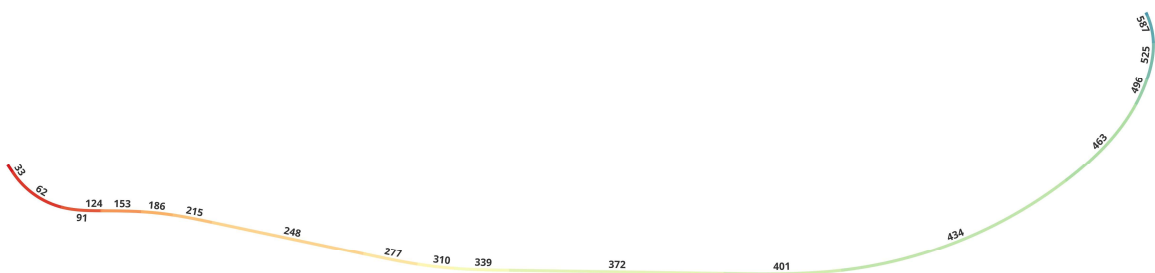
- *StartPoint* – punkt początkowy krzywej,
- *StartDirection* – kierunek początkowy krzywej,
- *StartRadiusOfCurvature* – początkowa krzywizna,
- *EndRadiusOfCurvature* – końcowa krzywizna,
- *SegmentLength* – całkowita długość segmentu,

- *PredefinedType* – typ krzywej (zgodnie z tabelą 10).

Do celu odczytu reprezentacji jawnej osi, w toku prac zaimplementowano funkcje umożliwiające ze zdefiniowanym krokiem (próbkowaniem), uzyskać współrzędne dla każdej z krzywych (np. linii, kłotoidy czy łuku kołowego). Poniżej zaprezentowano tabelaryczne (Tab. 11) zestawienie krzywych oraz długości projektowych, a także długości otrzymanych po stworzeniu reprezentacji jawnej. Porównując uzyskane długości dla każdego z segmentu nie zidentyfikowano różnic. Pojawiają się one natomiast po zsumowaniu długości, jednakże wydaje się, że są one zaniedbywalne (różnica to w zaokrągleniu 0.2 mm) i wynikać mogą np. z przyjętej częstotliwości próbkowania – 0.5m. Na rysunku poniżej przedstawiono wizualną reprezentację osi po przekształceniu do jawnej reprezentacji wektorowej (Rys. 36).

Tabela 11 Analiza segmentów osi oraz uzyskanych długości dla parametrów

id	StartPoint		Start Direction	StartRadius OfCurvature	EndRadius OfCurvature	Segment Length	Pre defined Type	Długość dla reprezentacji jawnej
	X	Y						
33	299047.1070	507092.8780	5.3049	0	0	17.8185	LINE	17.8185
62	299057.0580	507078.0971	5.3049	175	175	128.8617	CIRCULARARC	128.8617
91	299160.3031	507005.9242	6.0413	175	0	82.2857	CLOTHOID	82.2857
124	299242.0895	506998.9443	6.2764	0	0	2.3869	LINE	2.3869
153	299244.4764	506998.9280	6.2764	0	-750	83.3333	CLOTHOID	83.3333
186	299327.7715	506996.8182	-0.0624	-750	-750	66.8360	CIRCULARARC	66.8360
215	299394.2039	506989.6881	6.1317	-750	0	83.3333	CLOTHOID	83.3333
248	299476.0497	506974.0737	6.0762	0	0	323.8764	LINE	323.8764
277	299793.0098	506907.4988	6.0762	0	1000	115.6000	CLOTHOID	115.6000
310	299906.5611	506885.9236	6.1340	1000	1000	76.8075	CIRCULARARC	76.8075
339	299982.8786	506877.4307	6.2108	1000	0	115.6000	CLOTHOID	115.6000
372	300098.3951	506873.5143	6.2686	0	0	449.1689	LINE	449.1689
401	300547.5159	506866.9457	6.2686	0	950	246.2624	CLOTHOID	246.2624
434	300793.4940	506873.9760	6.3982	950	950	511.9990	CIRCULARARC	511.9990
463	301262.3942	507063.6902	0.6539	950	350.012	219.6786	CLOTHOID	219.6786
496	301408.6078	507225.3468	7.3666	350.012	350.012	57.2020	CIRCULARARC	57.2020
525	301431.1588	507277.8468	1.2468	350.012	150	77.8049	CLOTHOID	77.8049
558	301443.7508	507354.1710	1.6173	150	150	58.9646	CIRCULARARC	58.9646
587	301429.6518	507411.0353	2.0119	0	0	0.0998	LINE	0.0998
Długość całkowita						2717.9196	Długość całkowita	2717.9194



Rysunek 36 Wizualizacja jawnej reprezentacji osi w formacie wektorowym. Numery przy każdym segmencie odpowiadają id segmentu w Tab. 11.

W przypadku potrzeby odczytania informacji wysokościowej czy też przechyłek, kroki są podobne, jednakże wymagają odniesienia do odpowiednich klas zgodnie ze schematem na Rys. 34.

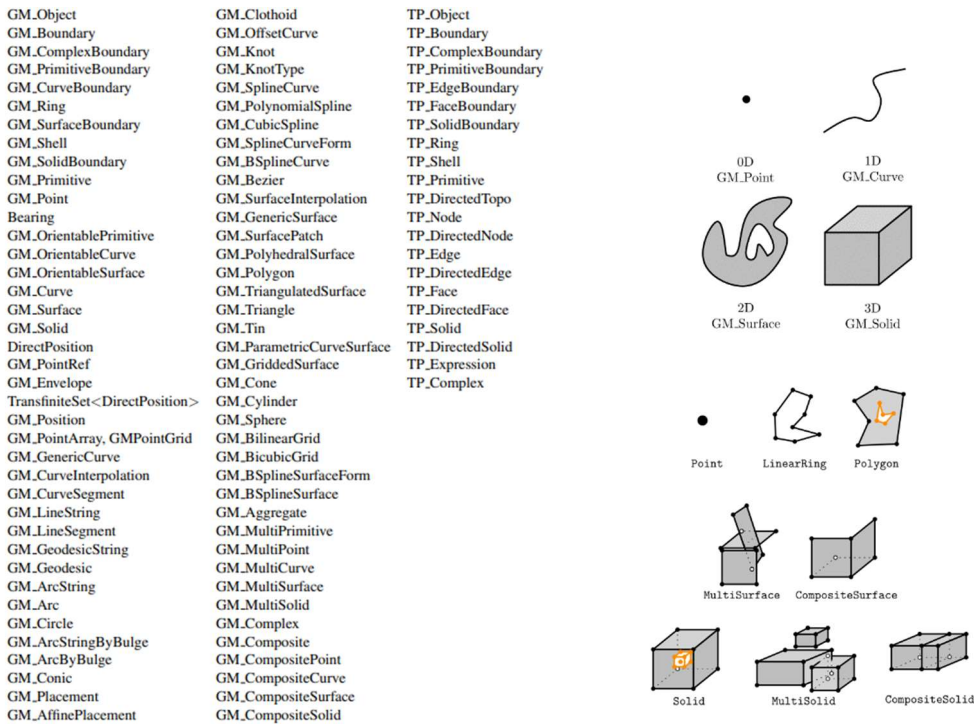
Aby uzyskać trójwymiarowy przebieg osi, należy zidentyfikować położenie każdego z punktów z położenia horyzontalnego, na krzywej informującej o przebiegu wysokościowym (profilu niwelety) np. na podstawie kilometrażu.

IV.5.3 Cyfrowe dane geoprzestrzenne – charakterystyka reprezentacji geometrycznej

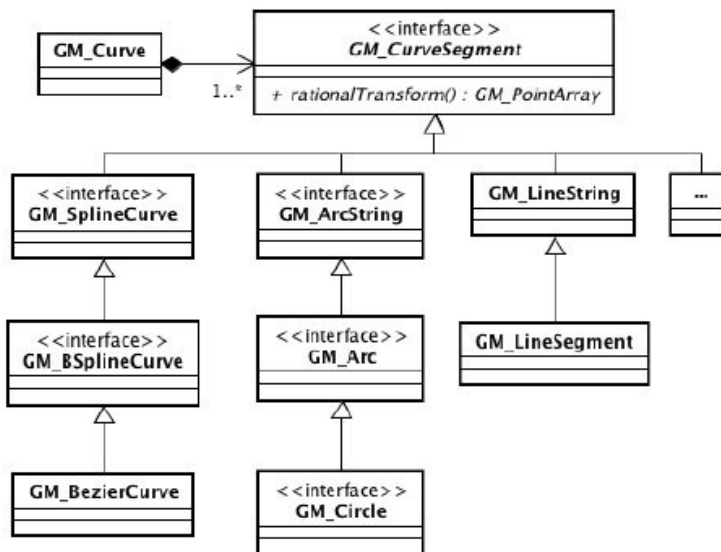
W przypadku reprezentacji cyfrowych danych geoprzestrzennych, głównym dokumentem opisującym zasady reprezentacji przestrzennej danych geoprzestrzennych w postaci wektorowej jest standard ISO 19107 (ISO 19107:2019 - Geographic information — Spatial schema, 2019). W ramach standardu wprowadzane są różne modele pojęciowe (z wykorzystaniem języka UML) reprezentacji geometrycznych, które są poniekąd zależne od wymiarowości. Podstawowe reprezentacje geometryczne to: 0D – *GM_Point*, 1D – *GM_Curve*, 2D - *GM_Surface* oraz 3D – *GM_Solid*. Rozpatrując relację pomiędzy powyższymi to *GM_Solid* składa się z wielu *GM_Surface*, w którym się zawiera wiele *GM_Curve*, który znowu składa się z wielu *GM_Point*. W ten sposób następuje podstawowa dekompozycja geometrii. Widoczne jest więc, że trójwymiarowa reprezentacja w technologii GIS jest typu BRep.

Ponadto standard umożliwia tworzenie reprezentacji, które agregują wiele reprezentacji tego samego typu. W efekcie uzyskiwane mogą być reprezentacje takie jak *GM_MultiPoint*, *GM_MultiCurve*, *GM_MultiSurface* czy *GM_MultiSolid*. W przypadku wystąpienia połączenia pomiędzy obiektami możliwe jest również tworzenie kompozycji *GM_Composite* np. *GM_CompositeCurve*. Ponadto możliwe są mniej standardowe reprezentacje, umożliwiające zapis w postaci siatki trójkątów *GM_TriangulatedSurface* czy *GM_PolyhedralSurface*.

Co więcej, w ramach standardów możliwy jest implementacja reprezentacji m.in. kłotoidy (*GM_Clothoid*), jednakże problemem są schematy implementacyjne, które nie umożliwiają zapisu informacji w ten sposób (np. CityGML) oraz brak wsparcia po stronie oprogramowania. Dodatkowo, w ramach standardu, możliwe jest opisanie geometrii z wykorzystaniem równań matematycznych. Ze względu na wysoki poziom ogólności oraz swoją złożoność, standard ISO 19107 nie jest łatwy do wdrożenia w celu wymiany danych (Atkinson i in., 2022). Poniżej przedstawiono możliwe do wykorzystania typy reprezentacji (Rys. 37) oraz przykładowe rodzaje *GM_Curve* (Rys. 38).



Rysunek 37 Rodzaje reprezentacji geometrycznych w domenie geoprzestrzennej na bazie ISO 19107. Po lewej lista dostępnych reprezentacji (Hobbs i in., 2006), po prawej przykłady wizualizacji (Ohuri i in., 2024)



Rysunek 38 Przykładowy podział GM_Curve i przykładowe możliwe do zastosowania typy krzywych w ramach ISO 19107 (François i in., 2010)

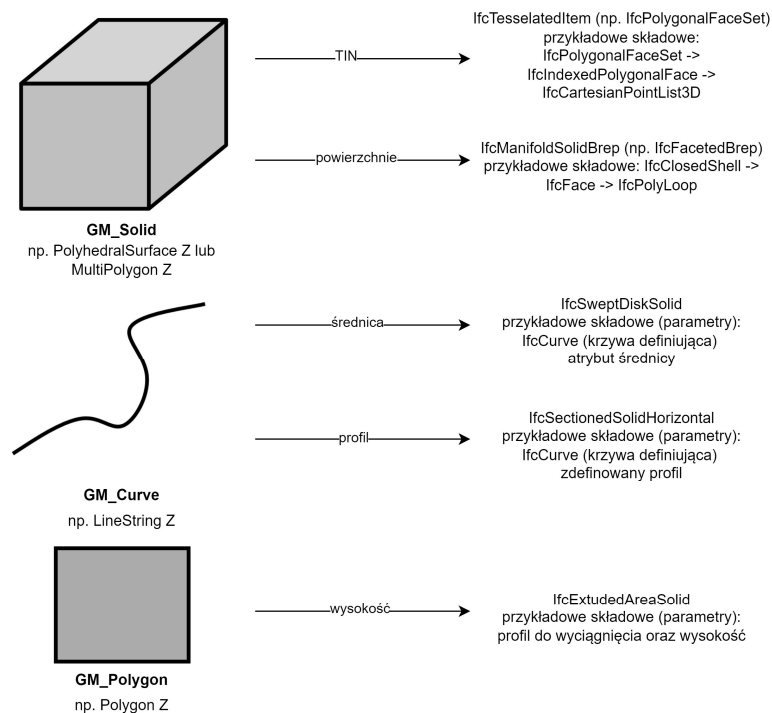
Podczas wytwarzania oprogramowania czy rozwiązań bazujących na powyżej opisanych reprezentacjach oraz standardzie należy również pamiętać o różnych zasadach, które determinują poprawność zapisu reprezentacji, w szczególności kwestie związane z poprawnością topologiczną. Dla płaszczyzn (*GM_Surface*) oraz brył trójwymiarowych (*GM_Solid*) mogą to być planarność, brak samo przecinania, odpowiednia ilość wierzchołków, zamknięcie, odpowiednia orientacja, odpowiedni zapis w przypadku otworów w powierzchniach (orientacja przeciwna).

Geometria i topologia stosowane w schemacie IFC są w części zbliżone do tych zdefiniowanych w ISO 19107 i pozwalają na stosowanie *boundary representation* (BRep),

jednakże na ten moment brak jest odpowiednich narzędzi do pełnej obsługi tego typu zapisu geometrii w oprogramowaniu GIS.

Dotychczasowe badania pokazują, że wiele geometrii zdefiniowanych w ISO 19107 jest odpowiednich dla reprezentacji obiektów wymaganych schematem IFC, wspólnie należących do klasy *IfcGeometricRepresentationItem*. Jednak nie zawsze istnieje wzajemna odpowiedniość typów geometrycznych pomiędzy IFC i ISO 19107 (w obu kierunkach). (Jetlund i in., 2020) wyjaśniają to na przykładzie klas *IfcCurve*, *IfcSurface* oraz *IfcAlignment* poprzez zamodelowanie przejście z reprezentacji EXPRESS stosowanej dla IFC, do UML. Istnieją także trudności w reprezentacji skomplikowanych obiektów przy uwzględnieniu warunków powyższego standardu przy konwersji geometrii.

W ramach przeprowadzonych prac zbadano możliwość konwersji reprezentacji geoprzestrzennej do reprezentacji stosowanych np. w ramach IFC. Dla tego celu należy zmapować odpowiednio reprezentacje oraz przeprowadzić proces transformacji do zdefiniowanego układu współrzędnych. Poniżej został przedstawiony schemat mapowania typowych geometrii stosowanych w domenie geoprzestrzennej do reprezentacji stosowanych w IFC (wraz z scenariuszami, gdy podane są informacje suplementarne) (Rys. 39). Ponadto w toku prac zaimplementowano algorytmy umożliwiające konwersje geometrii dla przykładów przedstawionych poniżej, co było bazą dla cyfrowych narzędzi wspierających opracowanych w ramach zrealizowanych prac opisanych w rozdziale V.



Rysunek 39 Schemat mapowania geometrii pomiędzy danymi w domenie geoprzestrzennej a IFC

IV.6 Dane alfanumeryczne i metadane w kontekście cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych

Kolejnym aspektem, która zostanie zbadany w ramach prac jest podejście do danych alfanumerycznych. Obie technologie stosują nieco inne założenia do pracy z tego typu danymi.

W przypadku cyfrowych danych budowlanych mamy najczęściej do czynienia z danymi alfanumerycznymi oraz odniesieniem do dokumentacji czy systemów zintegrowanych. Bardziej szczegółowo informacje oraz ich poziom szczegółowości jest definiowany przez standard LOIN (ISO 7817-1:2024 Building information modelling — Level of information need Part 1: Concepts and principles, 2024). W ramach tego standardu wraz z kolejnymi etapami projektu, model powinien być zaopatrywany w poszczególne informacje (przyrost informacyjny). Mogą to być między innymi informacje umożliwiające identyfikację komponentów, jak i opis ich właściwości. Ponadto powinna być również dołączona dokumentacja dotycząca poszczególnych komponentów np. instrukcje obsługi czy raporty wraz z kolejnymi etapami realizacji projektu.

Metadane w BIM pełnią również ważną rolę w ramach zarządzania informacją w CDE. Poszczególne kontenery informacji poprzez metadane mają zapisane informacje na temat etapu prac czy kontroli dostępu.

Rozpatrując zapis informacji alfanumerycznych w schemacie IFC można wyodrębnić kilka podstaw tych informacji. Po pierwsze są to zestawy właściwości, które opisują dany obiekt. Analizując zestaw właściwości dla np. dla klasy *IfcWall*, schemat IFC wyróżnia kilkanaście różnych domyślnych zestawów (Rys. 40). Dotyczą one informacji opisowych takich jak stan komponentu np. *Pset_Condition* czy też tolerancji dotyczących umiejscowienia czy kształtu elementu *Pset_Tolerance*, ale również informacji ilościowych takich jak podstawowe informacje o wymiarach *Qto_WallBaseQuantities*.

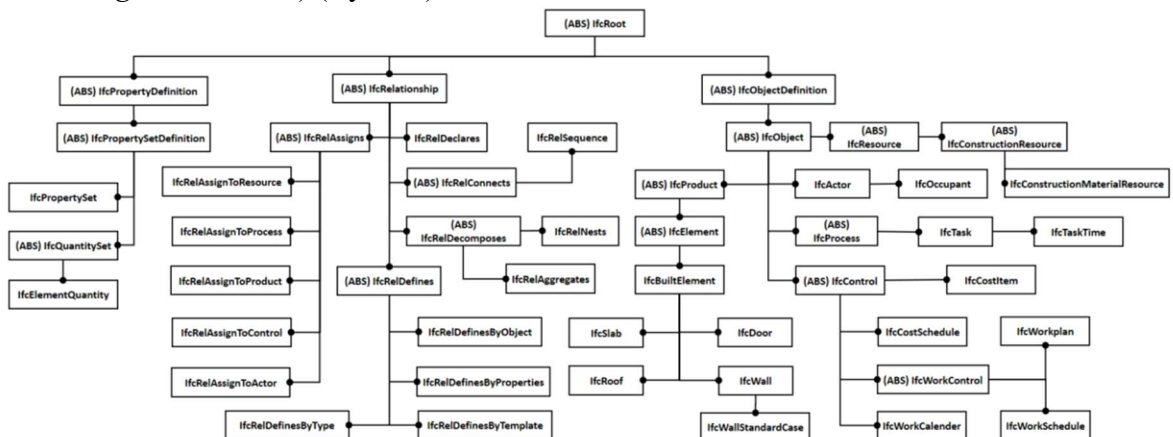
Zestawy właściwości są przypisywane do obiektu poprzez relację *IfcRelDefinesByProperties*, gdzie poprzez atrybut *RelatedObjects*, definiowane jest, które elementy mają otrzymać dany zestaw właściwości określany w ramach atrybutu *RelatingPropertyDefinition* odwołujący się do klas dziedziczonych po *IfcPropertySetDefinitionSelect* (Rys. 40).

Poszczególne właściwości mogą przyjmować różne typy danych. W przypadku danych ilościowych mogą być reprezentowane przez klasy takie jak np. *IfcQuantityVolume* czy *IfcQuantityArea*, które odwołują się odpowiednio do *IfcVolumeMeasure* (typ danych REAL) oraz *IfcAreaMeasure* (typ danych REAL). W przypadku danych opisowych typy danych mogą być różnorodne: binarne – *IfcBoolean*, logiczne – *IfcLogical*, tekstowe dla celów identyfikacji - *IfcIdentifier* (maksymalna długość znaków to 255), tekstowe dla celów nazywania elementów - *IfcLabel* (maksymalna długość znaków to 255), tekstowe dla celów opisu – *IfcText*, tekstowe opisujące datę w formacie YYYY-MM-DDThh:mm:ss – *IfcDateTime*, tekstowe opisujące datę w formacie YYYY-MM-DD *IfcDate*, tekstowe opisujące ilość czasu w formacie PnYnMnDTnHnMnS – *IfcDuration*, opisujące datowanie w postaci liczby całkowitej dla czasu. Istnieją również bardziej specjalistyczne klasy odnoszące się do konkretnych pomiarów czy też czynników. Ponadto są również właściwości, które muszą zostać opisane na podstawie wcześniej przygotowanym wartości (enumeracja – *PEnum*).

Pset_ConcreteElementGeneral AssemblyPlace CastingMethod ProductionCode	Pset_Condition AssessmentDate AssessmentCondition AssessmentDescription	Pset_ConstructionAdministration ProcessIdentifier SpecificationSectionNumber SpecificationSection	
Pset_ConstructionOccurrence InstallationDate ModeNumber TypeCode	Pset_ElementKinematics Condition CircleRange	Pset_EnvironmentalCondition ReferenceReferenceNumber ReferenceEnvironmentTemperature ReferenceEnvironmentHumidity	
Pset_EnvironmentalImpactIndicators Reference FunctionalUnitReference	Pset_EnvironmentalImpactValues TotalPrimaryEnergyConsumption WaterConsumption GlobalWarmingPotential	Pset_InstallationOccurrence InstallationDate AcceptanceDate InstallationPlace	
Pset_MaintenanceStrategy AssetCriticality AssetPriority	Pset_MaintenanceTriggerCondition ConditionTargetPerformance ConditionMaintenanceLevel	Pset_MaintenanceTriggerDuration DurationTargetPerformance DurationMaintenanceLevel	
Pset_MaintenanceTriggerPerformance TargetPerformance PerformanceMaintenanceLevel	Pset_ManufacturerOccurrence AcquisitionDate BarCode Manufacturer	Pset_ManufacturerTypeInformation GoodsTransferNumber ArticleNumber ManufacturerReference	
Pset_PrecastConcreteElementFabrication TypeDesignation ProductionCode ManufacturerReference	Pset_PrecastConcreteElementGeneral Condition ConditionReference	Pset_ReinforcementBarPitchOrWall Description Reference ReferenceCode	#13044=IFCWallStandardCase('2KQr47ZTnA8Ryoe56D8wHA', #12, 'Keller-A-04-1', \$, \$, #12997, #13039, ... #13057=IFCPropertySingleValue('LoadBearing', \$, IFCBOOLEAN('T'), \$); #13058=IFCPropertySingleValue('IsExternal', \$, IFCBOOLEAN('T'), \$); #13059=IFCPropertyEnumeratedValue('Status', \$, (IFCLABEL('EXISTING')), #11004); #13061=IFCPropertySet('SizeIdOfG_RN96hp3TO4M3M', #12, 'Esse_WallCommon', \$, \$, #13057, #13058, #13059); #13066=IFCRelDefinesByProperties('3B54WVZggg3WC02SpAEMN', #12, \$, \$, (#13044), #13061);
Pset_RepairOccurrence RepairContent RepairDate RepairPlace RepairProductionCode	Pset_Risk RiskName RiskType RiskValue	Pset_RoadGuardElement PARAMET Information Reference	#13044=IFCWallStandardCase('2KQr47ZTnA8Ryoe56D8wHA', #12, 'Keller-A-04-1', \$, \$, #12997, #13039, ... #13070=IFCQuantityLength('Length', \$, \$, 6.81, \$); #13071=IFCQuantityLength('Height', \$, \$, 2.38, \$); #13072=IFCQuantityLength('Width', \$, \$, 0.2, \$); #13073=IFCQuantityArea('GrossFootprintArea', \$, \$, 1.362, \$); #13074=IFCQuantityArea('NetFootprintArea', \$, \$, 1.362, \$); #13075=IFCQuantityArea('GrossSideArea', \$, \$, 15.7317999975, \$); #13076=IFCQuantityArea('NetSideArea', \$, \$, 15.7317999975, \$); #13077=IFCQuantityVolume('GrossVolume', \$, \$, 3.24156, \$); #13078=IFCQuantityVolume('NetVolume', \$, \$, 3.24156, \$); #13079=IFCElementQuantity('3qhc1E6uIDUCiWkTVuos7A', #12, 'BaseQuantities', \$, \$, (#13070, #13071, #13072, #13073, #13074, #13075, #13076, #13077, #13078)); #13081=IFCRelDefinesByProperties('3B0Yz1c93VR3IRx84K_Ap7', #12, \$, \$, (#13044), #13079);
Pset_ServiceLife ServiceNoDuration ManufacturerReference	Pset_Tolerance ToleranceDescription ToleranceValue ToleranceType	Pset_Uncertainty UncertaintyClass UncertaintyDescription UncertaintyGeometry	
Pset_WallCommon Reference Status AssemblyReference	Pset_Warranty WarrantyIdentifier WarrantyPeriod WarrantyReference	Qto_BodyGeometryValidation GrossSideArea NetSideArea GrossVolume NetVolume	
Qto_WallBaseQuantities Length Height Width			

Rysunek 40 Zestawy właściwości w schemacie IFC - przykład możliwych domyślnych zestawów właściwości dla klasy IfcWall (po lewej) (BuildingSMART, 2024) oraz zapis w pliku IFC (po prawej).

Kolejny rodzaj danych alfanumerycznych stanowi zawartość informacyjna wspierająca procesy związane z harmonogramowaniem czy kosztorysowaniem. Harmonogramowanie w strukturze IFC jest możliwe poprzez klasy takie jak *IfcProcess*, *IfcTask* oraz *IfcTaskTime*. Mogą one być przypisane do jednego lub wielu komponentów (*IfcRelAssignsToProduct*). Równoległe poprzez klasy *IfcControl* czy *IfcCostItem* możliwe jest modelowanie informacji o kosztach, również w oparciu o relację przypisania (*IfcRelAssignsToProduct*) (Rys. 41).



Rysunek 41 Struktura klas w schemacie IFC umożliwiającą zapis informacji o harmonogramie oraz kosztach (Sheik i in., 2023)

Ponadto wśród danych alfanumerycznych można jeszcze wymienić klasyfikację, która pozwala na identyfikację obiektów np. zgodnie ze zdefiniowanym standardem na bazie bSDD.

Rozpatrując tę samą problematykę od strony danych geoprzestrzennych, należy omówić kwestię dotyczącą metadanych. Metadane w GIS są standaryzowane przez: definicja i podstawowe informacje - ISO 19115: *Geographic information – Metadata* oraz baza aplikacyjna GML na podstawie XML - ISO 19139 *Geographic information Metadata XML schema implementation*. Dla celów opisu metadanych zostanie przeanalizowany przede wszystkim pierwszy z wymienionych dokumentów.

Same metadane są definiowane jako dane o danych i odnoszą się do opisów umożliwiających katalogowanie zasobów danych oraz usług, a także do identyfikacji cech pojedynczych obiektów, zbiorów danych czy usług. Sam standard ISO 19115 definiuje jakie

elementy powinny mieć metadane w celu jednoznacznej identyfikacji zbioru danych oraz zrozumienia przez użytkownika. Jednym z elementów standardów jest również georeferencja danych, która jest kluczowa dla celów identyfikacji przestrzennej obiektów.

Z uwagi na szerszy zakres informacji, metadane w przypadku danych geoprzestrzennych odnoszą się do informacji umożliwiających przede wszystkim ich identyfikację oraz zrozumienie, mniej, szczegółową informację o komponentach (atrybuty). Przykładowo, obraz (raster) powinien mieć zawarte informacje o rozdzielczości, zakresie informacji, liczbie kanałów itp... Rozpatrując dane geoprzestrzenne oraz ich atrybuty są one nie jako połączone ze sobą, natomiast metadane mają za zadanie ich opis na wyższym poziomie.

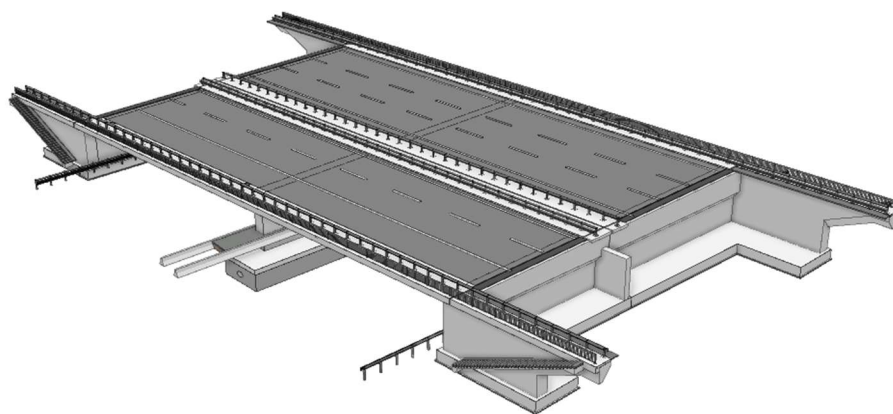
Interoperacyjność na poziomie metadanych jest jedną z barier oraz trudności w implementacji systemów umożliwiających na łączenie danych z domen geoprzestrzennych oraz budowlanych. Brak jest na ten moment ogólnych wytycznych, a nawet ujednoczonej terminologii pomiędzy domenami. Dlatego też ich przekształcanie oraz zapis i zrozumienie muszą być realizowane i standaryzowane w ramach konkretnych scenariuszy przez interesariuszy czy uczestników procesów realizujących dane czynności. Podobny wniosek został wysnuty w (ISO/TR 23262:2021 GIS (geospatial) / BIM interoperability, 2021).

W przypadku potrzeby konwersji metadanych, atrybutów czy zestawów właściwości pomiędzy systemami, należy przede wszystkim zweryfikować pojemność informacyjną oraz metody zapisu tych danych. Analizując przejście z cyfrowych danych geoprzestrzennych do budowlanych należy przede wszystkim przeprowadzić proces mapowania, w celu uzupełnienia odpowiednich atrybutów czy zestawów właściwości w ramach struktury IFC. W przypadku sytuacji odwrotnej, podczas przejścia z formatu IFC do systemów zapisu cyfrowych danych geoprzestrzennych, metoda zapisu jest zależna od docelowego formatu np. czy jest to format oparty na semantyce czy też geometrii. W przypadku formatów opartych na semantyce, należy przeprowadzić proces mapowania. Natomiast w przypadku formatów opartych o geometrię, należy przetworzyć dane alfanumeryczne np. do postaci kolumn lub zagregowanej formy słownikowej np. JSON.

IV.7 Praktyczne podejścia do łączenia oraz konwersji cyfrowych danych geoprzestrzennych i budowlanych

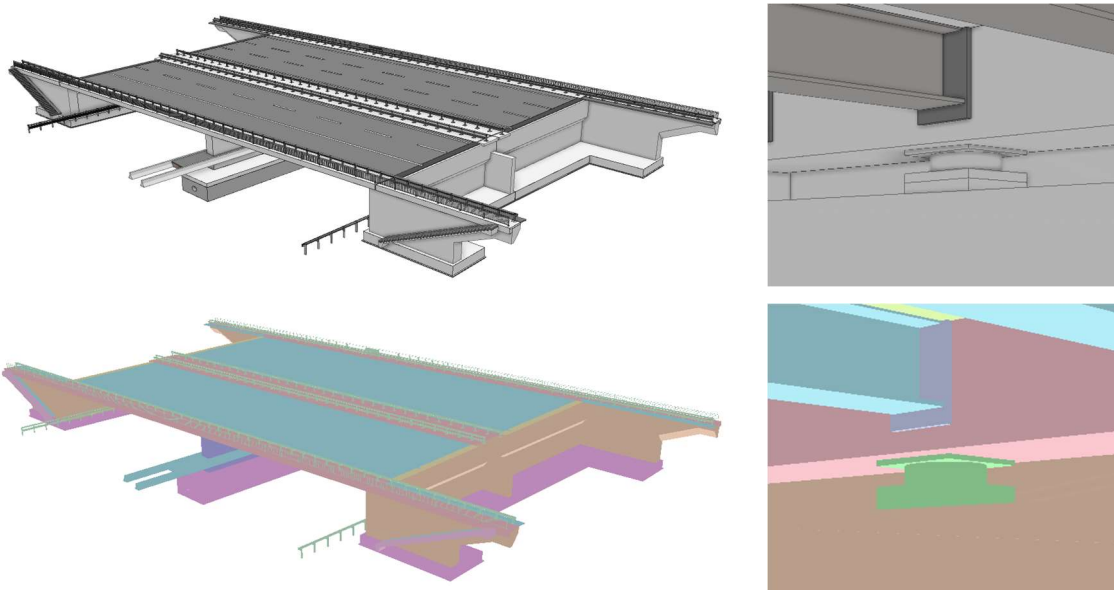
Jak omówiono w części teoretycznej, istnieją trzy główne podejścia do integracji cyfrowych danych budowlanych i geoprzestrzennych. Pierwsza metoda polega na konwersji cyfrowych danych budowlanych do domeny geoprzestrzennej, druga na zastosowaniu rozwiązania typu „łącznik”, a trzecia – na przekształceniu cyfrowych danych geoprzestrzennych do struktur odpowiadających cyfrowym danym budowlanym. W niniejszej sekcji zostaną przedstawione zaimplementowane w toku prac metody dla każdego z tych podejść.

Jako dane testowe wykorzystano model infrastrukturalny mostu w formacie IFC dostępny do prac badawczych (*IFCINFRA - przykładowe modele*, 2024) (Rys. 42) oraz reprezentację geometryczną typu *LineString* wraz z atrybutem średnicy, co ma zasymulować przebieg przewodu kanalizacyjnego.



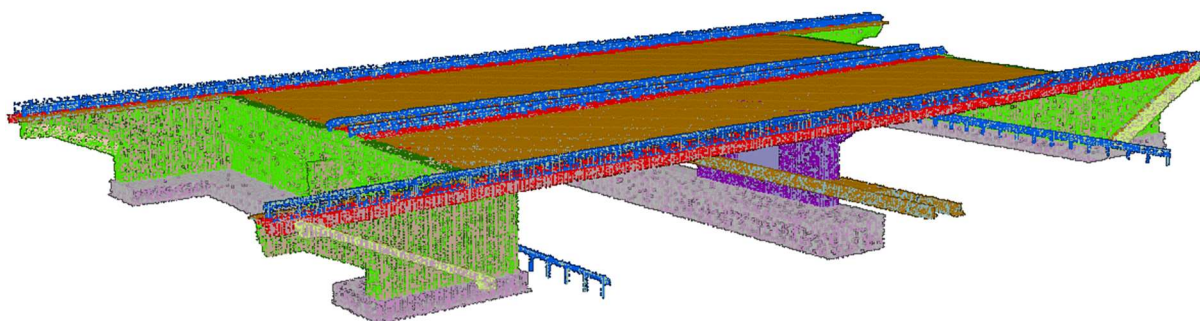
Rysunek 42 Model testowy na potrzeby przedstawienia algorytmów łączenia danych ((IFCINFRA - przykładowe modele, 2024)

Pierwsze podejście dotyczy konwersji cyfrowych danych budowlanych do wektorowej reprezentacji geoprzestrzennej umożliwiającej zapis do formatu ESRI Shapefile oraz geoprzestrzennej chmury punktów. W tym celu, odczytano jawną reprezentację geometrii z wykorzystaniem drugiego z opisanych algorytmów w sekcji IV.4.1. Następnie przeprowadzono proces mający na celu stworzenie odpowiedniej struktury danych, w tym, między innymi przetworzenie obiektów i ich składowych do reprezentacji *multipatch* wymaganej w ramach shapefile do zapisu trójwymiarowych danych wektorowych. Ponadto, zweryfikowano oraz poprawiono orientację otworów (odwrotna do głównych krawędzi) oraz do opisu każdego poligonu dodano wierzchołek, tak aby każdy poligon rozpoczynał się i kończył w tym samym punkcie – wymagania wynikające z standardów ISO 19107. Następnie z wykorzystaniem biblioteki *shapefile* stworzono funkcję zapisującą dany plik wraz z atrybutami takimi jak identyfikator oraz typ. Ponadto, w celu możliwości późniejszego połączenia, wyeksportowano do pliku *.csv* zestawy właściwości poszczególnych elementów. Takie podejście wynika z ograniczeń formatu ESRI Shapefile, który, na przykład, ogranicza długość opisu do maksymalnie 255 znaków oraz długość nazw kolumn do 10 znaków. Efekty działania algorytmu zostały zaprezentowane poniżej (Rys. 43).



Rysunek 43 Wizualizacja konwersji do formatu ESRI Shapefile. U góry plik IFC, u dołu ten sam plik przekonwertowany do reprezentacji wektorowej multipatch.

Równocześnie przeprowadzono konwersję danych do formatu chmury punktów. W tym celu stworzono reprezentacje jawną na podstawie algorytmu 1 z sekcji IV.5.1 umożliwiających odczyt reprezentacji jawnej w postaci trójkątów. Następnie iteracyjnie zagęszczono trójkąty, w celu stworzenia reprezentacji chmury punktów o zdefiniowanej gęstości. Dodano również możliwość dodania etykiet do chmury punktów w postaci typu. W efekcie istnieje możliwość uzyskania chmury punktów umiejscowionej w globalnej przestrzeni. Efekt działania algorytmu został przedstawiony poniżej (Rys. 44). Tego typu reprezentacja może posłużyć m.in. automatycznej budowie zbiorów danych uczących czy śledzenia postępu prac, poprzez porównanie chmur punktów na poszczególnych etapach realizacji (Glinka i in., 2024).



Rysunek 44 Wizualizacji konwersji do chmury punktów wraz z reprezentacją wektorową

Drugie podejście dotyczy wykorzystania łącznika w postaci bazy danych. W tym celu opracowano algorytmy umożliwiające na zbudowanie tabel z danymi dotyczącymi zestawu właściwości oraz geometrii w postaci jawnej w zdefiniowanym globalnym układzie współrzędnych. Jako docelową bazę danych wybrano postgresql oraz rozszerzenia PostGIS umożliwiające odniesienia geoprzestrzenne bezpośrednio w bazie danych oraz SFCGAL, czyli rozszerzenie bazujące na silniku geometrycznym CGAL umożliwiające przetwarzanie danych trójwymiarowych w bazach danych. W ten sposób możliwe jest wytwarzanie geometrii typu *solid*, która powinna być zgodna ze standardami dotyczącymi reprezentacji geoprzestrzennej dla Systemów Informacji Geograficznej.

W celu konwersji do bazy danych, odczytano dla poszczególnych komponentów reprezentację geometryczną, typ, zestaw właściwości, identyfikator oraz relację nadrzędną. Dla celów odczytu reprezentacji z pliku IFC wybrano pierwszy z algorytmów przedstawiony w sekcji IV.5.1. Poszczególne płaszczyzny dla każdego z obiektów zostały na początku zebrane w postaci MULTIPOLYGON Z, a następnie przekształcone do POLYHEDRALSURFACE Z oraz zapisane z wykorzystaniem WKT, w celu wczytania do bazy danych. Zestawy właściwości natomiast zostały przekształcone do struktury słownikowej (JSON), ponieważ umożliwia to zapis całej informacji w jednej wspólnej kolumnie oraz stosunkowo łatwy dostęp do zawartych tam informacji.

Poniżej zaprezentowano uzyskane wyniki: tabelę PostGIS z przekonwertowanymi danymi (Rys. 45) oraz wizualną reprezentację po wczytaniu do oprogramowanie FME (Rys. 46). Ponadto przeprowadzono analizę geometrii z wykorzystaniem narzędzia *GeometryValidator* w oprogramowaniu FME i uzyskano w pełni poprawną geometrię (zasady dotyczące reprezentacji danych geoprzestrzennych

ROZDZIAŁ V. Implementacja narzędzi wspierających Inwestycji realizowanej w technologii standardów otwartych BIM

cyfrowych Geodezyjną Obsługę

Na podstawie zidentyfikowanych przypadków zastosowania opisanych w sekcji IV.1 wybrano te dotyczące wprost Geodezyjnej Obsługi Inwestycji jako obszar, który wymaga największego pokrycia, z powodu braku narzędzi czy wytycznych. Następnie poszczególne przypadki użycia zostały szczegółowo przeanalizowane oraz zaimplementowane na bazie zbiorów testowych w postaci cyfrowych narzędzi wspierających.

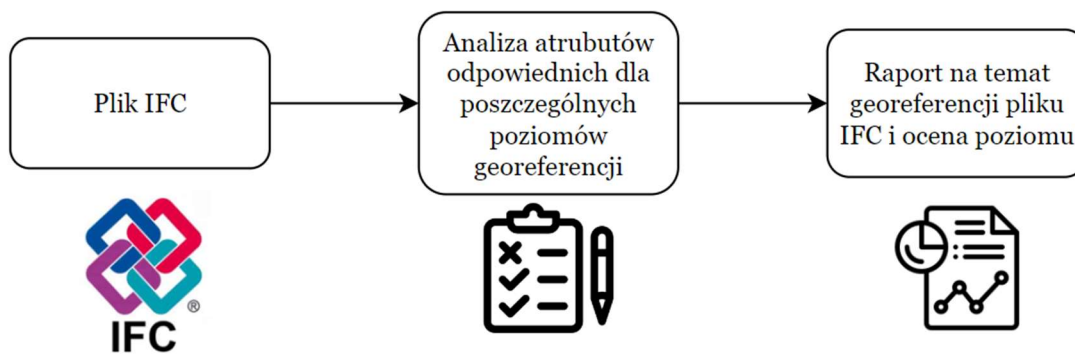
Implementacja cyfrowych narzędzi wspierających, dotyczyła opracowania rozwiązań bazujących na wytworzonych w toku prac algorytmach opisanych w rozdziale IV oraz dodatkowych modułach umożliwiających zrealizowanie poszczególnych przypadków zastosowania. Poszczególne rozwiązania stanowią prototypy i mogą być dalej rozwijane.

V.1.1 Nadanie, weryfikacja bądź poprawa georeferencji plików IFC

Poprawna georeferencja stanowi krytyczny aspekt, patrząc z punktu widzenia przeprowadzania procesów na styku cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych. W związku z tym, pierwszym krokiem w ramach prac będzie przedstawienie oraz implementacja metod umożliwiających jej weryfikację oraz nadanie. Problematyka ta zostanie przeanalizowana z perspektywy procesu inwestycyjnego, ze szczególnym uwzględnieniem weryfikacji wymiany informacji. Główna uwaga zostanie skierowana na georeferencję plików IFC.

Dodatkowym czynnikiem wymuszającym proces weryfikacji, a niekiedy konieczność korekty georeferencji w plikach IFC są ograniczenia oprogramowania do modelowania informacji w BIM, które nierzadko generuje błędne pliki IFC podczas eksportu i zapisu danych.

Pierwszym opracowanym w toku prac podejściem do weryfikacji georeferencji plików IFC jest algorytm umożliwiający analizę atrybutów przypisanych do odpowiednich klas poprzez szczegółową ocenę zawartości informacyjnej danego pliku IFC (Rys. 49). W ten sposób dla poszczególnych poziomów georeferencji sprawdzana jest obecność oraz poprawność atrybutów zgodnie z Tab. 7. Na początku parsowany jest plik, a następnie wybierane są poszczególne klasy, odpowiednio dla *LoGeoRef10*, *LoGeoRef20* i *LoGeoRef30 – IfcSite* oraz dla *LoGeoRef40* i *LoGeoRef50 – IfcProject*. Następnie analizowane są atrybuty oraz odniesienia.



Rysunek 49 Weryfikacja georeferencji poprzez analizę atrybutów w pliku IFC

Z uwagi na fakt, że jedynym na ten moment poziomem georeferencji, który umożliwia łączenie z danymi geoprzestrzennymi jest ten najwyższy (*LoGeoRef50*), postanowiono w toku prac zaproponować dla niższych poziomów (*LoGeoRef30* oraz *LoGeoRef40*) rozwiązanie suplementarne, umożliwiające zdefiniowanie układu współrzędnych poprzez parametr lub dołączenie pliku definiującego projekcję w postaci WKT (plik z rozszerzeniem *.prj*). Tego typu podejście umożliwia wykorzystanie danych w formacie IFC do integracji z cyfrowymi danymi geoprzestrzennymi również dla plików z niższym poziomem georeferencji.

Przykładowy rezultat działania algorytmu weryfikującego został przedstawiony poniżej (Tab. 13).

Tabela 13 Przykładowy raport weryfikacji georeferencji dla pliku IFC

Raport georeferencji dla pliku	le50_building.ifc
<i>Poziom georeferencji</i>	5
<i>Współrzędne globalne</i>	565010.0, 243752.7, 204.1
Raport opisowy	
<pre> { "LeGeoRef10": {"InternalLocation": "412", "AddressLines": "()", "PostalBox": "00-000", "Town": "Krak\u00f3w", "Region": "wojew\u00f3dztwo ma\u0142opolskie", "PostalCode": "00-000", "Country": "Polska"}, "LeGeoRef20": {"RefLatitude": "(49, 1, 59, 680200)", "RefLongitude": "(8, 23, 27, 528000)", "RefElevation": "110.0"}, "LeGeoRef30": {"RefDirection": [0.5, 0.5, 0.0], "Axis": [0.0, 0.0, 1.0], "X": "0.0", "Warning": "Potential error in the H coordinate of the object placement", "Y": "0.0", "H": "0.0", "Unknown": []}, "LeGeoRef40": {"RefDirection": [1.0, 0.0, 0.0], "Axis": [0.0, 0.0, 1.0], "X": "0.0", "Y": "0.0", "H": "0.0", "TrueNorth": [1.0, 0.0], "Warning": ["Potential error in the X coordinate of the WorldCoordinateSystem attribute", "Potential error in the Y coordinate of the WorldCoordinateSystem attribute", "Potential error in the H coordinate of the WorldCoordinateSystem attribute", "Potential error in TrueNorth attribute"]}, </pre>	

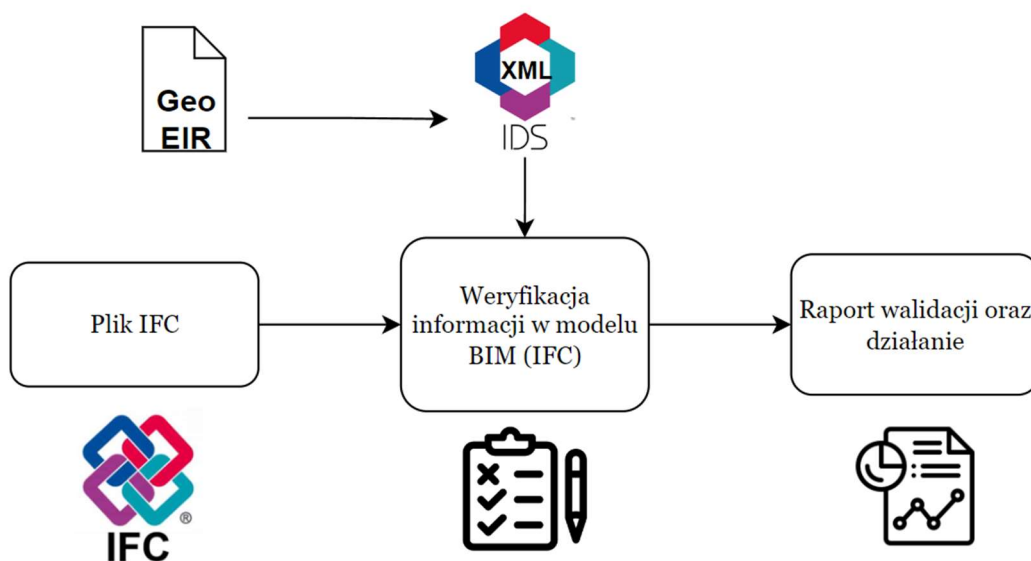
```

"LeGeoRef50":
{"XAxisAbscissa": 1.0, "XAxisOrdinate": 0.0, "Scale": 1.0, "X": "565010.0", "Y":
"243752.7", "H": "204.1", "id": "205696", "type": "IfcProjectedCRS", "Name":
"EPSG:2180", "VerticalDatum": "KRON86",
"Unknown": ["Description", "GeodeticDatum", "MapProjection", "MapZone",
"MapUnit"]}

```

Z drugiej strony, obecnie realizowane są prace nad standardem IDS, służącym weryfikacji informacji zawartych w modelach IFC. Dlatego też w toku prac zaprezentowano metodykę sprawdzania georeferencji właśnie na bazie tego standardu (Rys. 50) oraz porównano do pierwszej zaproponowanej metody.

Pierwszym jej elementem jest źródło informacji dla celów walidacji. Georeferencja powinna być zdefiniowana w ramach wymagań informacyjnych zamawiającego w części poświęconej domenie geoprzestrzennej (GeoEIR). Tego typu informacja może dotyczyć definicji układu współrzędnych płaskich, układu wysokościowego czy też innych odniesień oraz parametrów georeferencji (zgodnie z Tab. 7). Na bazie tych parametrów możliwe jest wytworzenie plików XML, zgodnie ze standardem IDS. Schemat (XSD) definiujący możliwe do wystąpienia procedury w ramach IDS jest dostępny na (buildingSMART, 2024g). Sama jego struktura składa się z części opisowej, w której definiowane są ogólne właściwości danego pliku oraz części specyfikacji, w której określone są procedury oraz zasady jakie powinien spełnić dany plik IFC. Zasady mogą dotyczyć zarówno obecności jakiejś klasy, relacji z inną klasą, jak i wystąpienia określonego atrybutu. Ponadto definiowane mogą być warunki, takie jak parametr obligatoryjny, zakazany czy opcjonalny. Jednakże, z uwagi na ograniczone jeszcze możliwości standardu, istnieją trudności w weryfikacji geometrii oraz bardziej zagnieżdżonych atrybutów np. dotyczących umiejscowienia poszczególnych klas (*ObjectPlacement*). W związku z tym, ograniczona jest możliwość weryfikacji atrybutów na poziomie *LoGeoRef30* oraz *LoGeoRef40*. Jednakże, dla poziomów *LoGeoRef10*, *LoGeoRef20* oraz *LoGeoRef50* (co najważniejsze), IDS może być wykorzystywany.



Rysunek 50 Weryfikacja georeferencji plików IFC z wykorzystaniem standardu IDS

Poniżej zaprezentowano opracowaną w toku prac specyfikacje IDS w formacie XML umożliwiającą weryfikację georeferencji dla zdefiniowanego pliku (Rys. 51).

```

<specification name="LoGeoRef50_1" ifcVersion="IFC4">
  <applicability minOccurs="0" maxOccurs="unbounded">
    <entity>
      <name>
        <simpleValue>IfcProjectedCRS</simpleValue>
      </name>
    </entity>
  </applicability>
  <requirements>
    <name>
      <simpleValue>Name</simpleValue>
    </name>
    <value>
      <simpleValue>EPSG:2180</simpleValue>
    </value>
    <attribute cardinality="optional">
      <name>
        <simpleValue>Description</simpleValue>
      </name>
    </attribute>
    <attribute cardinality="required">
      <name>
        <simpleValue>GeodeticDatum</simpleValue>
      </name>
      <value>
        <simpleValue>ETRS89</simpleValue>
      </value>
    </attribute>
    <attribute cardinality="required">
      <name>
        <simpleValue>VerticalDatum</simpleValue>
      </name>
      <value>
        <simpleValue>EVRF2007</simpleValue>
      </value>
    </attribute>
    <attribute cardinality="required">
      <name>
        <simpleValue>MapProjection</simpleValue>
      </name>
      <value>
        <simpleValue>Poland CS1992</simpleValue>
      </value>
    </attribute>
    <attribute cardinality="optional">
      <name>
        <simpleValue>MapZone</simpleValue>
      </name>
    </attribute>
    <attribute cardinality="required">
      <name>
        <simpleValue>MapUnit</simpleValue>
      </name>
      <value>
        <simpleValue>metre</simpleValue>
      </value>
    </attribute>
  </requirements>
</specification>

```

ns1:title	ns1:version	ns1:description	ns1:purpose	name	ifcVersion	minOccurs	maxOccurs	ns1:simpleValue	cardinality	ns1:simpleValue2	ns1:simpleValue3
Georeferencing	0.1	This IDS is about georeferencing	Georeferencing	LoGeoRef10_1	IFC4	0	unbounded	IfcSite	required	SiteAddress	
Georeferencing	0.1	This IDS is about georeferencing	Georeferencing	LoGeoRef10_2	IFC4	0	unbounded	IfcPostalAddress	optional	InternalLocation	
Georeferencing	0.1	This IDS is about georeferencing	Georeferencing	LoGeoRef10_2	IFC4	0	unbounded	IfcPostalAddress	required	AddressLines	
Georeferencing	0.1	This IDS is about georeferencing	Georeferencing	LoGeoRef10_2	IFC4	0	unbounded	IfcPostalAddress	required	PostalCode	
Georeferencing	0.1	This IDS is about georeferencing	Georeferencing	LoGeoRef10_2	IFC4	0	unbounded	IfcPostalAddress	required	Town	
Georeferencing	0.1	This IDS is about georeferencing	Georeferencing	LoGeoRef10_2	IFC4	0	unbounded	IfcPostalAddress	required	Country	
Georeferencing	0.1	This IDS is about georeferencing	Georeferencing	LoGeoRef10_2	IFC4	0	unbounded	IfcPostalAddress	optional	PostalBox	
Georeferencing	0.1	This IDS is about georeferencing	Georeferencing	LoGeoRef10_2	IFC4	0	unbounded	IfcPostalAddress	optional	Region	
Georeferencing	0.1	This IDS is about georeferencing	Georeferencing	LoGeoRef20	IFC4	0	unbounded	IfcSite	required	RefLatitude	
Georeferencing	0.1	This IDS is about georeferencing	Georeferencing	LoGeoRef20	IFC4	0	unbounded	IfcSite	required	RefLongitude	
Georeferencing	0.1	This IDS is about georeferencing	Georeferencing	LoGeoRef20	IFC4	0	unbounded	IfcSite	required	RefElevation	
Georeferencing	0.1	This IDS is about georeferencing	Georeferencing	LoGeoRef30	IFC4	0	unbounded	IfcSite	required	ObjectPlacement	
Georeferencing	0.1	This IDS is about georeferencing	Georeferencing	LoGeoRef40	IFC4	0	unbounded	IfcProject	required	RepresentationContexts	
Georeferencing	0.1	This IDS is about georeferencing	Georeferencing	LoGeoRef50_1	IFC4	0	unbounded	IfcProjectedCRS	required	Name	EPSG:2180
Georeferencing	0.1	This IDS is about georeferencing	Georeferencing	LoGeoRef50_1	IFC4	0	unbounded	IfcProjectedCRS	optional	Description	
Georeferencing	0.1	This IDS is about georeferencing	Georeferencing	LoGeoRef50_1	IFC4	0	unbounded	IfcProjectedCRS	required	GeodeticDatum	ETRS89
Georeferencing	0.1	This IDS is about georeferencing	Georeferencing	LoGeoRef50_1	IFC4	0	unbounded	IfcProjectedCRS	required	VerticalDatum	EVRF2007
Georeferencing	0.1	This IDS is about georeferencing	Georeferencing	LoGeoRef50_1	IFC4	0	unbounded	IfcProjectedCRS	required	MapProjection	Poland CS1992
Georeferencing	0.1	This IDS is about georeferencing	Georeferencing	LoGeoRef50_1	IFC4	0	unbounded	IfcProjectedCRS	optional	MapZone	
Georeferencing	0.1	This IDS is about georeferencing	Georeferencing	LoGeoRef50_1	IFC4	0	unbounded	IfcProjectedCRS	required	MapUnit	metre
Georeferencing	0.1	This IDS is about georeferencing	Georeferencing	LoGeoRef50_2	IFC4	0	unbounded	IfcMapConversion	required	Eastings	564971.6
Georeferencing	0.1	This IDS is about georeferencing	Georeferencing	LoGeoRef50_2	IFC4	0	unbounded	IfcMapConversion	required	Northings	243722.7
Georeferencing	0.1	This IDS is about georeferencing	Georeferencing	LoGeoRef50_2	IFC4	0	unbounded	IfcMapConversion	required	OrthogonalHeight	203.97

Rysunek 51 Wizualizacja stworzonego IDS na potrzeby weryfikacji georeferencji. Po lewej weryfikacja LoGeoRef50 w zapisie XML, po prawej tabelaryczne zestawienie wymagań w wytworzonej specyfikacji.

Weryfikacja została wykonana przy użyciu narzędzia *ifctester* (Ifcopenshell, 2024b). W wyniku uzyskano następujące rezultaty (Rys. 52). Na ich podstawie możliwe jest podjęcie działań związanych z np. odesłaniem pliku do jego wykonawcy w celu poprawy. Dzięki temu istnieje możliwość budowania automatycznych rozwiązań, również w oparciu o CDE pozwalających na automatyzację rozwiązań weryfikacji. Z punktu widzenia procesów integracji z cyfrowymi danymi geoprzestrzennymi jest to aspekt kluczowy.

LoGeoRef50_1

42% Checks passed 3 / 7 Elements passed 0 / 1

Fail Applicability

- All IfcProjectedCRS data

Requirements

- The Name shall be EPSG:2180
- The Description shall be provided
- The GeodeticDatum shall be ETRS89
- The VerticalDatum shall be EVRF2007
- The MapProjection shall be Poland CS1992
- The MapZone shall be provided
- The MapUnit shall be metre

LoGeoRef50_2

66% Checks passed 2 / 3 Elements passed 0 / 1

Fail Applicability

- All IfcMapConversion data

Requirements

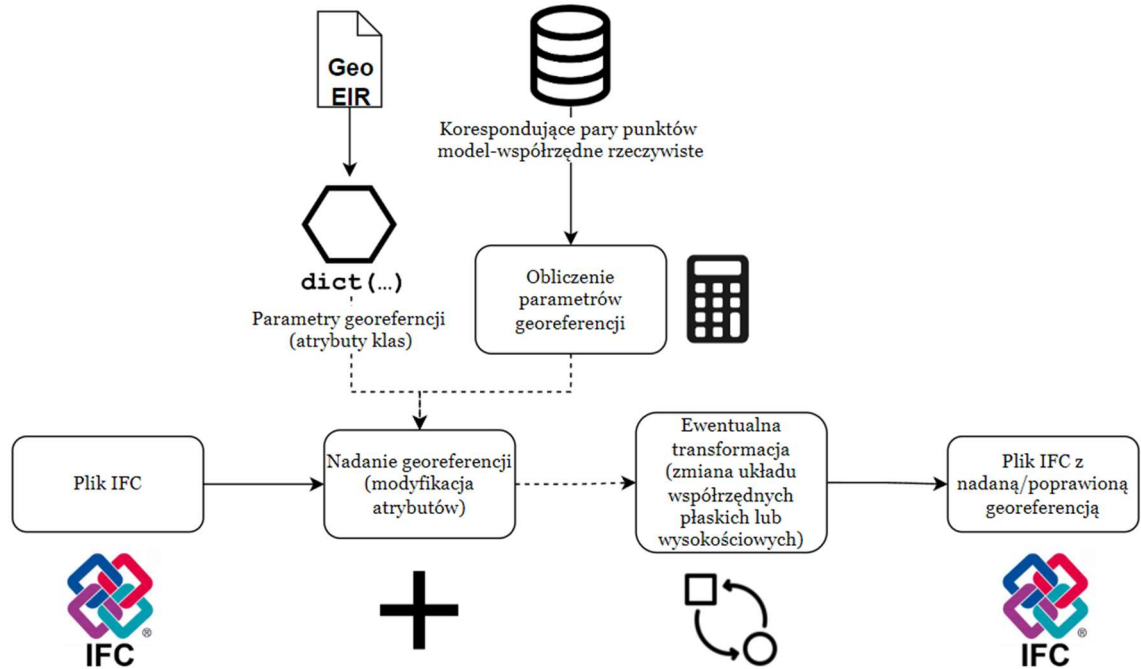
- The Eastings shall be 564971.6
- The Northings shall be 243722.7
- The OrthogonalHeight shall be 203.97

Rysunek 52 Walidacja z wykorzystaniem narzędzia *ifctester* opracowanej specyfikacji IDS dla przykładowego pliku IFC.

Porównując oba podejścia do walidacji georeferencji, można zauważyć pewne różnice. W pierwszym z proponowanych rozwiązań sprawdzane są wszystkie atrybuty definiujące wszystkie poziomy georeferencji oraz estymowany jest poziom georeferencji. Drugie rozwiązanie jest bardziej rygorystyczne, ponieważ sprawdza zdefiniowane klasy i atrybuty (np. w wymagania informacyjnych EIR) oraz weryfikuje czy wprowadzone

informacje w modelu są zbieżne z tymi oczekiwanymi. Docelowy wybór rozwiązania zależy więc od zastosowania.

Kolejnym elementem, który jest istotny z punktu widzenia georeferencji plików IFC jest jej nadawanie. Poprzez nadawanie georeferencji dla pliku IFC rozumiane jest przypisanie do odpowiednich instancji klas parametrów umożliwiających na jednoznaczną identyfikację obiektu w zdefiniowanym globalnym układzie współrzędnych. Proces ten może odbywać się na podstawie różnych informacji wstępnych (Rys 53).



Rysunek 53 Schemat procesu nadania lub korekcji georeferencji pliku IFC

Pierwsze z podejść dotyczy możliwości przypisania parametrów np. z wymagań informacyjnych, z części dotyczącej domeny geoprzestrzennej (GeoEIR) czy też innych źródeł danych wykorzystywanych jako elementy standaryzujące wymianę informacji w projekcie. W ramach zaimplementowanego w toku prac cyfrowego narzędzia wspierającego zaproponowano rozwiązanie umożliwiające georeferencję plików IFC na bazie parametrów zdefiniowanych w zmiennej typu słownik. Następnie, w przypadku braku, tworzone są odpowiednie struktury i klasy oraz parametry są dystrybuowane do odpowiednich klas w celu zapewnienia georeferencji modelu.

Drugie podejście dotyczy możliwości obliczenia parametrów georeferencji na podstawie punktów korespondujących – punkty w układzie modelu np. w odniesieniu do klasy *IfcSite* do punktów w rzeczywistym zdefiniowanym globalnym układzie współrzędnych. Na tej podstawie możliwe jest obliczenie parametrów transformacji afinicznej oraz przypisanie jej do którejś z klas dziedziczących po klasie *IfcCoordinateOperation* (*IfcRigidOperation* bądź *IfcMapConversion*). Należy jednak pamiętać o należytej dokładności podczas wyboru punktów. W przypadku większej liczby zidentyfikowanych punktów możliwe jest również obliczenie parametrów dokładnościowych transformacji.

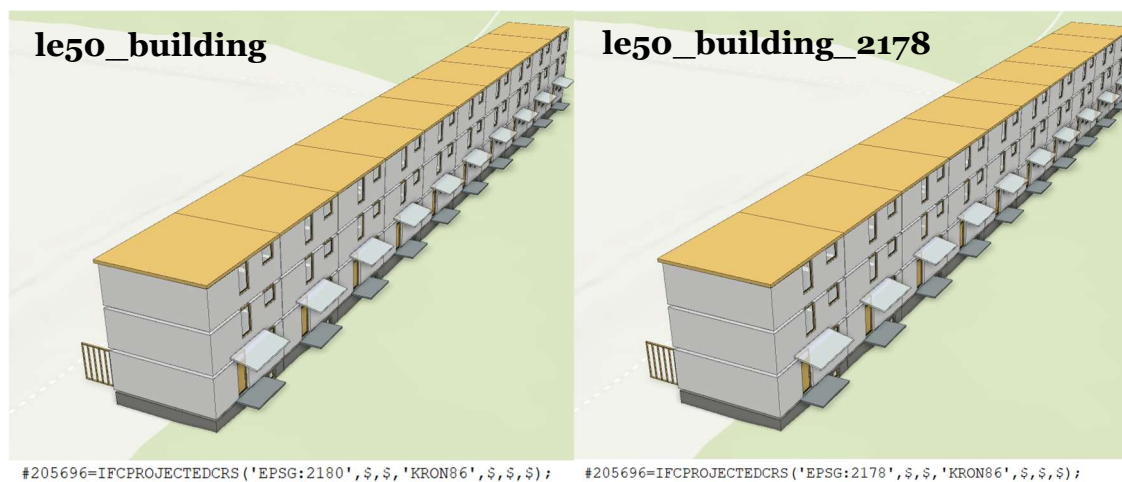
W celu nadania georeferencji, przygotowano model testowy IFC na bazie modelu o nazwie *Smiley West* (KIT, 2024), a następnie zweryfikowano podejściem przedstawionym na Rys. 49 poziom georeferencji. W efekcie uzyskano informacje, że model nie posiada

georeferencji nawet na poziomie 1. Ponieważ, widoczny jest brak georeferencji, założono następujące parametry (np. Na bazie GeoEIR) (Rys. 54 – w lewy dolnym rogu), a następnie wykorzystano opracowany w toku prac moduł do nadawania georeferencji (Rys. 54).



Rysunek 54 Lewy górny róg model testowy; prawy górny róg odczytana georeferencja dla modelu wejściowego; parametry georeferencji do przypisania (lewy dolny róg), prawy dolny róg odczytana georeferencja i poziom po nadaniu georeferencji.

Ponadto, na bazie biblioteki PROJ stworzono funkcje wspierające transformacje plików IFC pomiędzy globalnymi układami współrzędnych. Z uwagi na fakt, że georeferencja na poziomie najwyższym jest podawana przez punkt oraz orientację (z wykorzystaniem rzędnej i odciętej), dla celów transformacji, stworzono tymczasowy punkt, który również podlegał przekształceniu, tak aby później móc obliczyć orientację w nowym układzie współrzędnych. Dodatkowo, umożliwiono także transformację wysokościową pomiędzy układami wysokościowymi (np. Na podstawie plików definiujących geoidę), w tym również możliwość transformacji na wysokości elipsoidalne. Poniżej zaprezentowano przykładowe przetransformowane pliki (Rys. 55), które ułożone są dokładnie w tym samym miejscu po transformacji, co potwierdza poprawność procesu. Dla celów wizualizacji wykorzystano układ EPSG:2178.



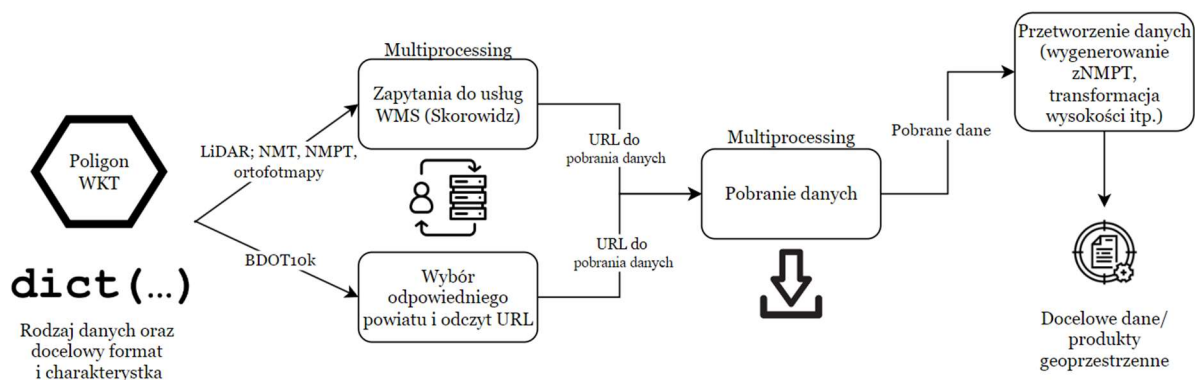
Rysunek 55 Wizualizacja procesu transformacji pliku IFC

Georeferencja jest kluczowym czynnikiem determinującym możliwość przeprowadzenia procesu integracji, łączenia czy konwersji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych. Dlatego też, dla celów zapewnienia jakości oraz

poprawności przypadków użycia wykorzystujących dane z obu tych domen, wymagane jest szczegółowe opisanie w dokumentach standaryzujących wymianę informacji (takich jak EIR) kwestii dotyczących wymaganych atrybutów. Ich weryfikacja umożliwia natomiast walidację plików, a co jest tego efektem, zapewnienie poprawności przeprowadzenia kolejnych procesów. Jednakże w przypadku zidentyfikowania błędów, braków czy też różnic możliwe jest nadanie parametrów georeferencji z wykorzystaniem podejścia parametrycznego (poprzez wskazanie atrybutów odpowiednich klas) lub matematycznego (poprzez wskazanie punktów korespondujących, a następnie obliczenie parametrów transformacji oraz uzupełnienie atrybutów odpowiednich klas modelu). W niniejszej sekcji opracowano cyfrowe narzędzia wspierające umożliwiające przeprowadzenie powyżej wspomnianych czynności, co może przyczynić się do usprawnienia prac związanych z łączeniem cyfrowych danych geoprzestrzennych i budowlanych.

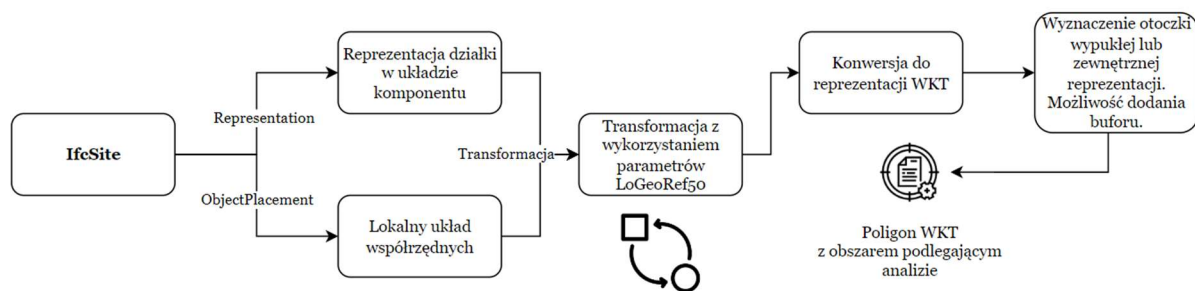
V.1.2 Wykorzystanie otwartych danych geoprzestrzennych do wsparcia podejmowania decyzji w początkowych fazach inwestycji oraz jako podkład do prac koncepcyjnych

Opracowane w ramach niniejszego przypadku zastosowania narzędzia pozwalają na integrację cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych na kilku płaszczyznach. Pierwszym elementem opracowanym w toku prac jest schemat oraz narzędzie umożliwiające na odczyt zakresu przestrzennego pliku IFC (przy założeniu najwyższego poziomu georeferencji). Drugim komponentem dla celów obsługi niniejszego scenariusza są opracowane metody umożliwiające automatyczne pobieranie danych otwartych pochodzących z zasobów udostępnianych przez Główny Urząd Geodezji i Kartografii (Rys. 56). Opracowana funkcjonalność pozwala na integrację z modelem IFC w celu odczytu zakresu pobrania danych dla określonego obszaru na bazie zdefiniowanego z wykorzystaniem WKT Poligonu. Następnie poprzez zapytanie do poszczególnych usług możliwe jest bezpośrednie pozyskanie adresu URL do pobrania danych podzielonych ze względu na arkusze lub, w przypadku danych w postaci BDOT10k, pobranie paczki danych dla całej jednostki terytorialnej np. powiatu. Następnie dane mogą być przetworzone w celu wygenerowania znormalizowanego NMPT, zastosowania transformacji wysokości, ekstrakcji określonych informacji czy dostosowania do obszaru analizy. Ponadto możliwa jest konwersja pozyskanych cyfrowych danych geoprzestrzennych do formatu IFC. Dane mogą posłużyć jako podkład do modelowania informacji np. koncepcji, do ekstrakcji określonych informacji, a w efekcie pozwalają na wsparcie procesów podejmowania decyzji w początkowych fazach inwestycji.



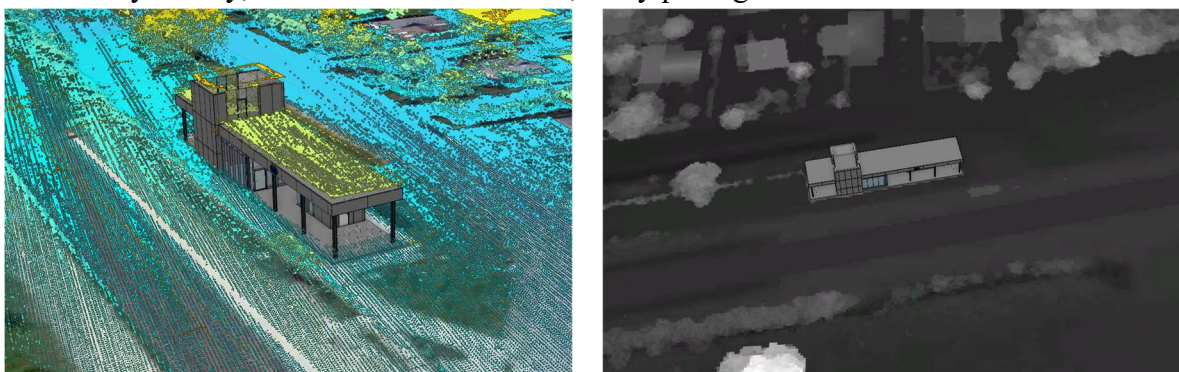
Rysunek 56 Schemat pozyskania danych otwartych

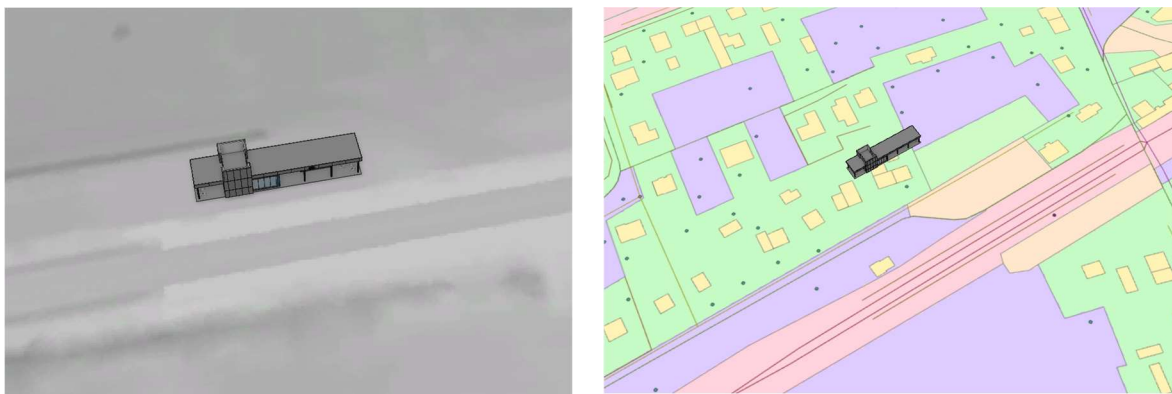
Integracja z BIM odbywa się poprzez wskazanie obszaru zdefiniowanego np. w ramach EIR lub poprzez uzyskanie zakresu przestrzennego działki czy też zakresu robót zdefiniowanych w klasie *IfcSite* (Rys. 57). W zależności od metody zapisu oraz stosowanych rozwiązań możliwe jest również odczytanie poligonu z bazy danych. Dla celów przedstawienia niniejszego przykładu zastosowania założono, że dostarczony jest plik IFC z nadanym najwyższym poziomem georeferencji oraz obszarem (działką ewidencyjną) zdefiniowanym w ramach klasy *IfcSite*.



Rysunek 57 Odczyt reprezentacji dla klasy *IfcSite*

Poniżej zostały przedstawione rezultaty automatycznie pobranych danych dla przykładowego pliku (Rys. 58). Pozyskanie danych dla przedstawionego poniżej modelu testowego zamodelowanego na potrzeby projektu ERJU zajęło około 1 minuty. Jednakże czas ten może być różny, w zależności od obszaru, który podlega analizie.





Rysunek 58 Model na podkładzie pobranych danych otwartych dla działki i modelu oraz okolicy. Po lewej stronie u góry - chmura punktów LiDAR oraz ortofotomapa, po prawej u góry NMPT, po lewej u dołu NMT, po prawej u dołu BDOT10k (poszczególne warstwy wektorowe).

Pozyskane dane mogą zostać wykorzystane do wsparcia zadania na etapie przygotowania inwestycji czy też wariantowania na etapie realizacji koncepcji zarówno dla projektów kubaturowych, jak i infrastrukturalnych. Ponadto, możliwa jest dalsza nadbudowa algorytmów w celu wypracowania narzędzi analitycznych do identyfikacji ryzyka czy przetwarzania danych geoprzestrzennych w celu weryfikacji różnych scenariuszy np. różnego rodzaju symulacje oraz oceny wpływów otoczenia na dany wariant inwestycji.

Istnieje również możliwość przetworzenia uzyskanego np. Numerycznego Modelu Terenu do formatu IFC. Jednakże ten sposób przechowywania danych jest nieefektywny ze względu na metodę zapisu danych. Poniżej została przeprowadzona analiza porównawcza dla Numerycznego Modelu Terenu zapisanego w siatce GRID z wykorzystaniem formatu *.xyz* oraz w postaci IFC. Konwersję siatki GRID do IFC wykonano z wykorzystaniem narzędzia (Clemen i in., 2021).

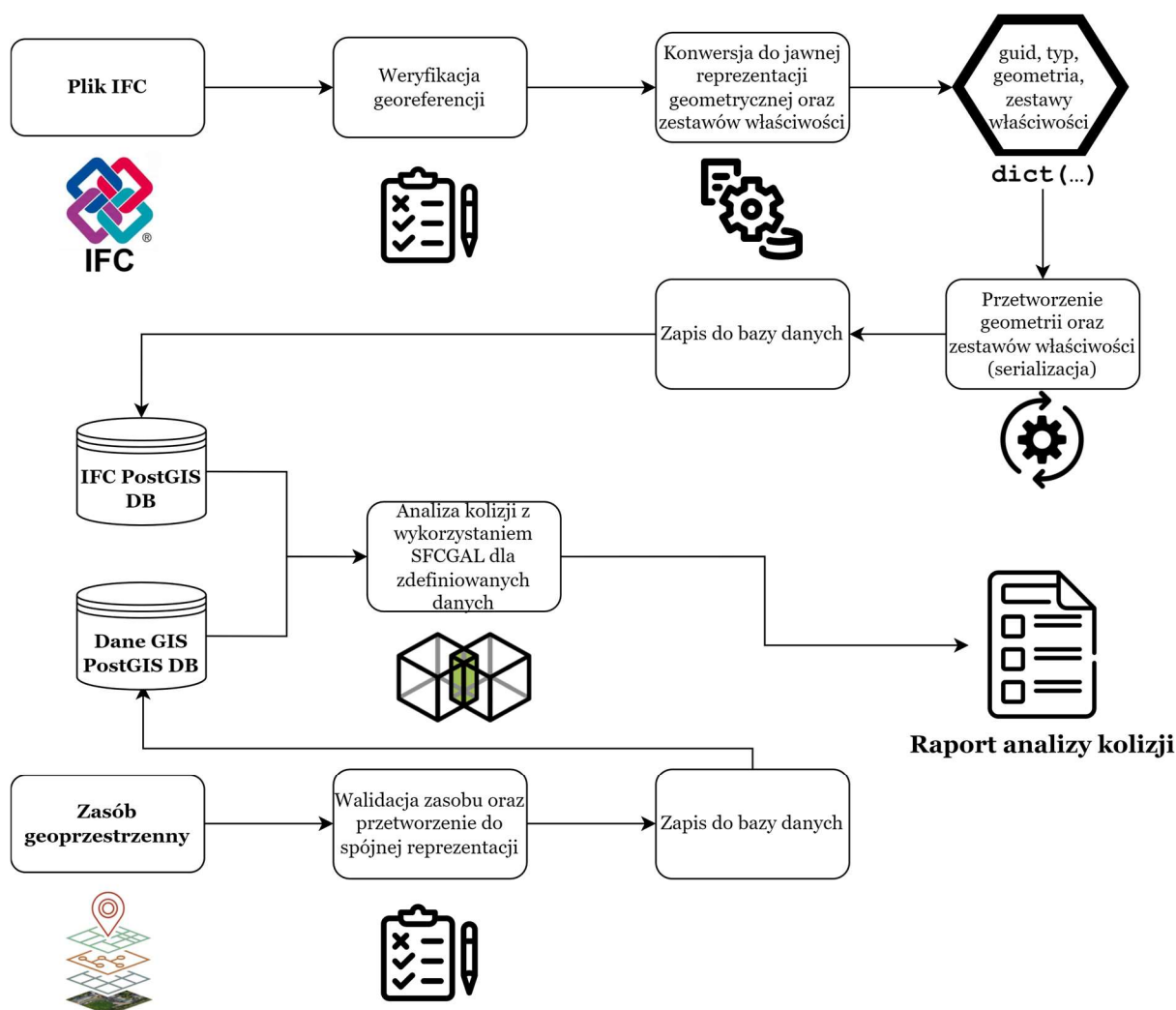
Dla obszaru około 5.9ha i siatki GRID o wielkości oczka 1m uzyskane wielkości plików to odpowiednio: dla pliku *.xyz* - 1644 KB oraz *.ifc* 18583 KB. Widoczna jest więc w zaokrągleniu 11 krotna różnica w objętościach plików, co dla terenów opisanych przez dane o wyższej rozdzielczości może stanowić barierę wynikającą z potrzebnej mocy obliczeniowej dla przetwarzania plików IFC. Stąd też wniosek, że pliki IFC nie są odpowiednim nośnikiem informacji o szczegółowym ukształtowaniu terenu, co wynika w głównej mierze ze struktury oraz metody zapisu danych opartej o struktury semantyczne.

V.1.3 Wykrycie i przeprowadzenie analizy potencjalnych kolizji na podstawie cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych (kolizje zewnętrzne)

W metodyce BIM analiza kolizji jest standardowym procesem koordynacyjnym umożliwiającym bardziej efektywne zarządzanie projektem oraz informacją. Ideą przeprowadzania procesu detekcji kolizji jest identyfikowanie i rozwiązywanie potencjalnych konfliktów między elementami czy komponentami projektu na wczesnym etapie, co pozwala na uniknięcie kosztownych i czasochłonnych poprawek w późniejszych fazach. Dzięki temu procesowi możliwe jest lepsze zarządzanie projektem, zwiększenie efektywności pracy zespołów projektowych oraz minimalizacja ryzyka błędów, co przekłada się na bardziej płynny

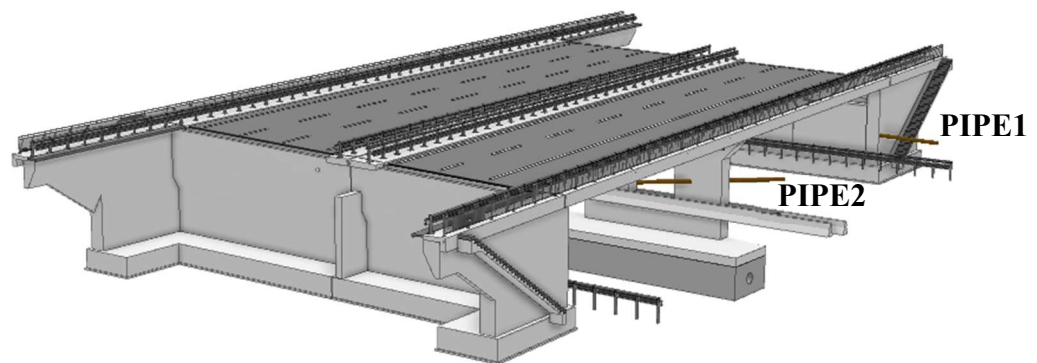
przebieg realizacji inwestycji budowlanych. Jednakże, w celu przeprowadzenia procesu detekcji kolizji, dane muszą być najczęściej w jednym ekosystemie.

W ramach niniejszego przykładu zastosowania w toku prac opracowano rozwiązanie umożliwiające przeprowadzanie analiz kolizji pomiędzy cyfrowymi danymi budowlanymi oraz geoprzestrzennymi. W tym celu opracowano algorytm, który umożliwia przetworzenie reprezentacji geometrycznej zagnieżdżonej (w pliku IFC) do reprezentacji jawnej, stosowanej w domenie geoprzestrzennej, umiejscowionej w zdefiniowanym globalnym układzie współrzędnych. Do tego celu wykorzystano algorytmy opisane w sekcji IV.4. Następnie reprezentację wraz z metadanymi zapisano do tabeli typu PostGIS. Podobnie postąpiono z cyfrowymi danymi geoprzestrzennymi, które także zostały zapisane do tabeli PostGIS. Poniżej zaprezentowano w sposób schematyczny rozwiązanie problemu oraz przedstawiono poszczególne kroki (Rys. 59).



Rysunek 59 Schemat przedstawiający algorytm do przeprowadzania analiz kolizji zewnętrznych

Przygotowane dane testowe nie są danymi w pełni realnymi, jednakże zostały one przygotowane tak, aby jak najbardziej urealnić przykład zastosowania. W ich skład wchodzi: opisywany w sekcji IV.6 model mostu oraz plik ESRI Shapefile imitujący przebieg dwóch pojedynczych nitek sieci uzbrojenia terenu na podstawie danych z Tab. 12.

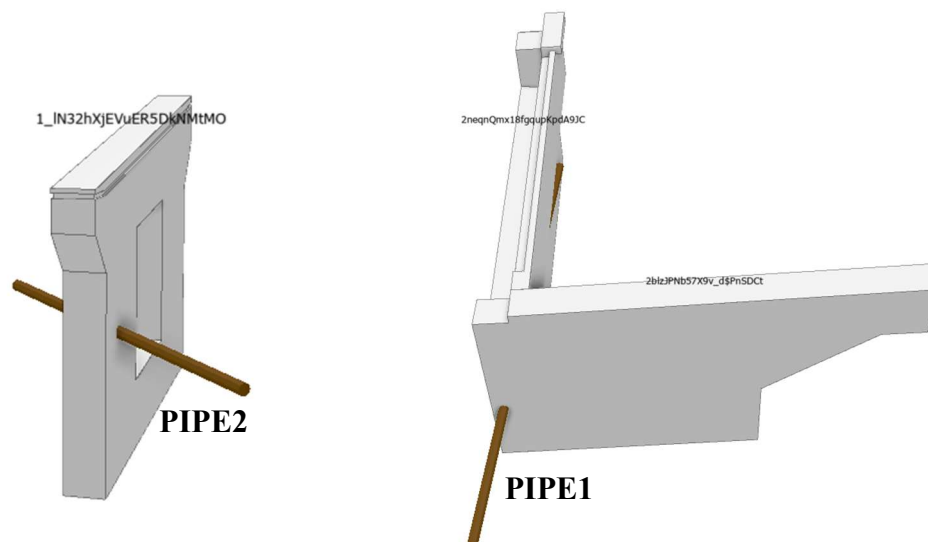


Rysunek 60 Dane wejściowe dla algorytmu: model mostu (w odcieniach szarości) oraz dwie nitki przewodów (na pomarańczowo)

Algorytm bazuje na przejściu do rozwiązania typu „łącznik” (BUD → & ← GEO) w postaci bazodanowej reprezentacji PostGIS. Następnie dane są lub mogą być walidowane oraz wykorzystując silnik SFCGAL przeprowadzana jest detekcja kolizji poprzez analizę przecięcia pomiędzy obiektami. Jako rezultat otrzymywany jest raport z analizy kolizji w postaci tabelarycznej.

W toku prac zaproponowano dwie podstawowe możliwości przeprowadzania analizy kolizji: bazującą na zidentyfikowaniu tylko przecięcia (metoda PostGIS *ST_3DIntersects*) i zwróceniu listy obiektów przecinających oraz druga zwracająca również obszar przecięcia (metoda PostGIS *ST_3DIntersection*).

W celu walidowania rezultatów przeanalizowano w sposób manualny jakie rezultaty powinny zostać uzyskane dla zdefiniowanych zbiorów danych.



Rysunek 61 Rezultaty przecięcia jakie powinny zostać uzyskane dla obu obiektów liniowych. Przy elementach z pliku IFC przypisano GlobalID w celach weryfikacyjnych.

Następnie przeprowadzono analizę kolizji z wykorzystaniem bazy danych PostGIS i uzyskano następujące rezultaty Tab. 14.

Tabela 14 Uzyskane rezultaty detekcji kolizji na podstawie bazy danych PostGIS

PIPE1

ID Przecięcia	GlobalID	Klasa	Geometria [WKB]	Przecięcie [WKT]
0	2blzJPNb57X9v d\$PnSDCt	IfcWall	010F0000A0...	TIN z (((565138.17...
1	2neqnQmx18fggupKpdA9JC	IfcWall	010F0000A0...	TIN z (((565144.34...
PIPE2				
0	1_IN32hXjEVuER5DkNMtMO	IfcColumn	010F0000A0...	TIN z (((565120.47...

Widoczne jest więc pokrycie pomiędzy uzyskanymi *GlobalID* dla komponentów w Tab. 14, dla których występuje kolizja z tymi na Rys. 61, co potwierdza możliwość wykorzystania opracowanej metodyki do przeprowadzania analizy kolizji zewnętrznych.

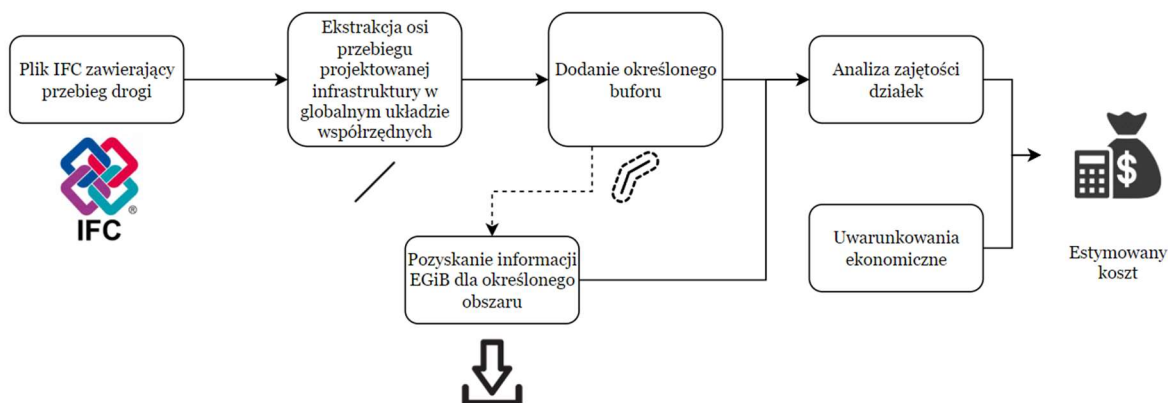
Na bazie tak uzyskanych rezultatów istnieje możliwość rozwoju algorytmu poprzez wytworzenie BCF i wymianę informacji w ramach standardów otwartych, ponieważ specyfikacja ta bazuje na *GlobalID*, może być właściwie wytwarzana w dowolnym oprogramowaniu. W tym celu możliwe jest wykorzystanie np. rozszerzenia biblioteki *ifcopenshell* o nazwie *bcf*.

Opracowana metodyka może wspomóc procesy analizy kolizji w przypadku posiadania danych w dwóch różnych systemach danych cyfrowych: geoprzestrzennym oraz budowlanym, co znowu pozwolić może na zwiększenie jakości przeprowadzanych procesów oraz uniknięcie potencjalnych kolizji na późniejszych etapach prac. Rozwiązaniem alternatywnym może być konwersja danych w postaci geoprzestrzennej do formatu IFC oraz przeprowadzenie detekcji kolizji w oparciu o narzędzia do koordynacji prac.

V.1.4 Wsparcie procesu wyceny inwestycji poprzez połączenie cyfrowych danych budowlanych z danymi geoprzestrzennymi

Niniejszy przykład zastosowania dotyczy wykorzystania procesu integracji cyfrowych danych budowlanych z danymi geoprzestrzennymi w początkowej fazie inwestycji infrastrukturalnej. Jego celem jest przeprowadzenie estymacji kosztów związanych z potrzebą przejścia czy też wywłaszczenia gruntów. W tym celu przyjęto założenie, że przebieg drogi (oś) został zapisany w pliku IFC wykorzystując klasę *IfcAlignment*, natomiast jako bufor przyjęto 50 metrów wokół osi.

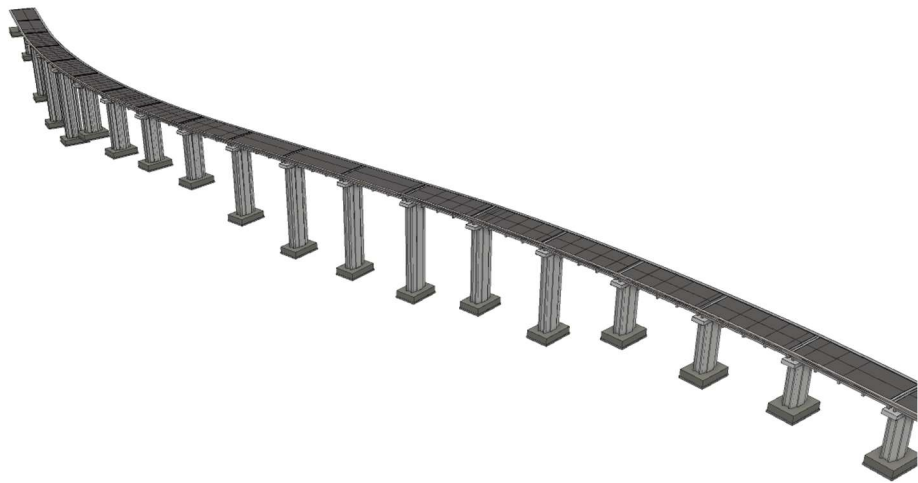
Poniżej przedstawiono schematyczne rozwiązanie zdefiniowanego przykładu zastosowania (Rys. 62).



Rysunek 62 Przykład zastosowania wsparcia wyceny projektu poprzez połączenie cyfrowych danych budowlanych z danymi geoprzestrzennymi

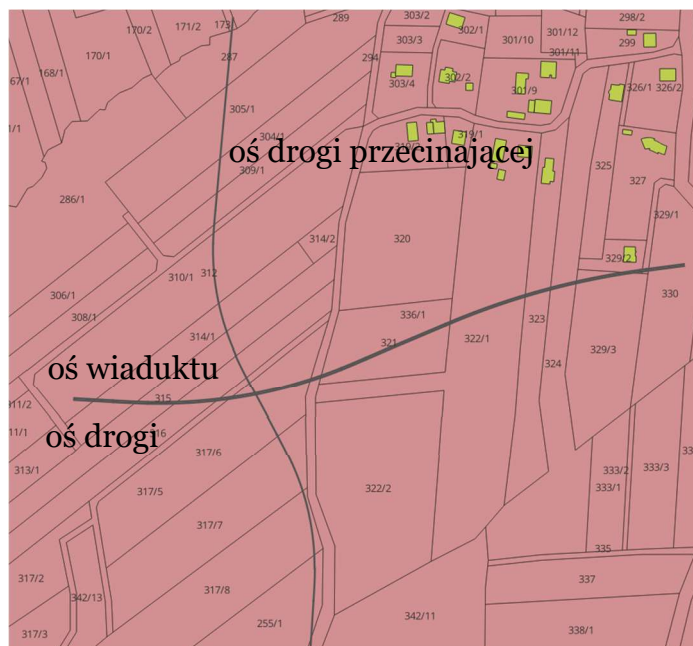
W celu ekstrakcji przebiegu projektowanej infrastruktury przygotowano cyfrowe narzędzia umożliwiające przekonwertowanie poszczególnych elementów osi do reprezentacji odpowiedniej dla domeny geoprzestrzennej. W tym celu przekonwertowano reprezentację klasy *IfcHorizontalAlignment* do dwuwymiarowej reprezentacji geoprzestrzennej. Szczegółowo klasa *IfcAlignment* oraz proponowane podejście zostało opisane w sekcji IV.5.2.

Jako dane testowe wykorzystano zmodyfikowany plik IFC (nazwa *Viadotto Acerno*) znajdujący się w repozytorium plików dla deweloperów implementujących schemat IFC (buildingSMART, 2024e) (Rys. 63). Model testowy posiada trzy osie: oś drogi, oś mostu (wiaduktu) oraz oś drogi przechodzącej pod wiaduktem. Dla celów przedstawienia przypadku użycia, dla modelu nadano georeferencję odpowiadającą terenowi w okolicach Krakowa. Wynika to z braku implementacji standardu dla infrastruktury (IFC 4x3) dla terenu Polski i braku możliwości przeprowadzenia analizy na danych w pełni rzeczywistych.

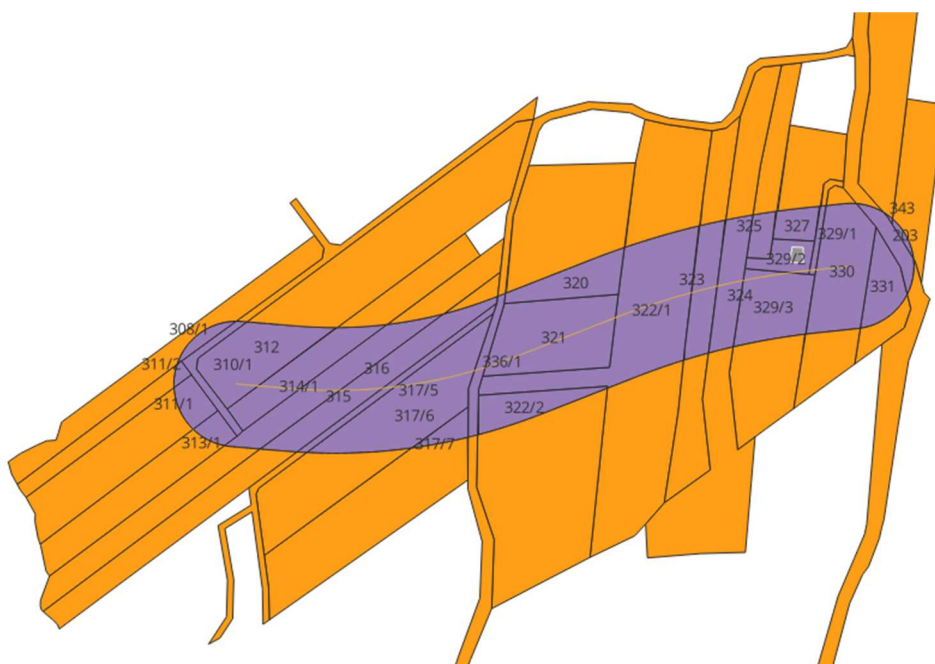


Rysunek 63 Plik testowy (*Viadotto Acerno*) wykorzystany w ramach niniejszego przykładu zastosowania (buildingSMART, 2024e)

Następnie przeprowadzono automatyczną konwersję wyodrębnionej osi do reprezentacji typu WKT. Dla tak przygotowanych danych automatycznie pobrano dane dotyczące Ewidencji Gruntów i Budynków (EGiB). Dane zostały pozyskane z odpowiedniego terytorialnie organu prowadzącego zasób (w badanym przypadku jest to powiat krakowski). Wizualizacja osi poszczególnych obiektów infrastrukturalnych zawartych w pliku została przedstawiona poniżej na podkładzie działek i budynków (Rys. 64). Kolejnymi krokami było przeprowadzenie analizy geoprzestrzennej, którą zaimplementowano z wykorzystaniem bibliotek *shapely* i *geopandas*. Rezultaty zostały przedstawione poniżej (Rys. 65; Tab. 15; Tab. 16).



Rysunek 64 Wizualizacja osi obiektów infrastrukturalnych zamodelowanych w pliku testowym na podkładzie Ewidencji Gruntów i Budynków



Rysunek 65 Wizualizacja działek oraz budynku w obrębie zdefiniowanego korytarza

Tabela 15 Rezultaty przeprowadzonych analiz dla działek będących w obrębie korytarza

NUMER DZIAŁKI	NUMER OBRĘBU	NUMER JEDN.	Powierzchnia [m ²]	Pow. przecięcia [m ²]	Procent pow. cał. [%]	Ilość części pozostałych
344/4	0001	09_2	3545.6	125.5	3.5	1
327	0001	09_2	3559.4	853.8	24.0	1
313/1	0001	09_2	4582.5	514.0	11.2	1
329/3	0001	09_2	6792.5	3055.7	45.0	1
343	0001	09_2	5389.4	15.6	0.3	1
329/2	0001	09_2	1028.6	1028.6	100.0	0
322/1	0001	09_2	20231.0	7904.6	39.1	2

317/7	0001	09 2	8962.4	568.4	6.3	1
315	0001	09 2	8932.1	3379.9	37.8	2
322/2	0001	09 2	13881.4	1806.9	13.0	1
317/6	0001	09 2	10074.7	5679.3	56.4	1
331	0001	09 2	2485.4	1641.2	66.0	1
323	0001	09 2	6161.0	2098.9	34.1	2
311/1	0001	09 2	6104.8	833.8	13.7	1
329/1	0001	09 2	401.4	254.9	63.5	1
321	0001	09 2	5468.2	5468.2	100.0	0
314/1	0001	09 2	5073.6	2697.6	53.2	1
310/1	0001	09 2	2718.3	777.0	28.6	1
312	0001	09 2	14399.8	3727.5	25.9	1
317/5	0001	09 2	2357.1	960.3	40.7	1
330	0001	09 2	6251.7	4136.2	66.2	2
325	0001	09 2	2717.7	666.5	24.5	1
316	0001	09 2	8372.0	3651.8	43.6	2
324	0001	09 2	11608.2	2115.0	18.2	2
336/1	0001	09 2	6568.0	814.5	12.4	2
320	0001	09 2	9612.3	2070.1	21.5	1
308/1	0001	09 2	5381.9	371.9	6.9	1
311/2	0001	09 2	2109.2	155.8	7.4	1
203	0001	09 2	22298.7	830.0	3.7	2

Tabela 16 Zidentyfikowany budynek będący w obszarze zdefiniowanego korytarza

ID budynku	Rodzaj	Geometria
120609_2.0001.329/2.1_BUD	m	POLYGON ((5...

Następnie dodając parametry ekonomiczne, zależne np. od regionu możliwe jest oszacowanie kosztów wynikających z potrzeby wyłączeń czy przeprowadzenia działań związanych z rozgraniczeniami czy podziałem nieruchomości.

Przykład zastosowanie nie wydaje się nadto skomplikowany (w szczególności z punktu widzenia analiz geoprzestrzennych), jednakże istniejące oprogramowanie (w szczególności geoprzestrzenne) nie umożliwia ekstrakcji osi obiektów infrastrukturalnych na bazie stosowanych otwartych standardów takich jak IFC. Brak jest więc elastyczności. Z drugiej strony, oprogramowanie z sektora budowlanego nie umożliwia przeprowadzania analiz geoprzestrzennych oraz identyfikacji przestrzennej obiektów. Stąd też potrzeba wytwarzania tego typu cyfrowych narzędzi wspierających budowlane procesy inwestycyjne. Przykładowo, oprogramowanie ArcGIS Pro konwertuje wszystkie dane do reprezentacji multipatch, która dla niektórych przykładów zastosowania może być niewystarczająca.

Przykładowe wykorzystanie może również dotyczyć wariantowania inwestycji oraz oceny wpływu na zabudowania w ujęciu Ewidencji Gruntów i Budynków.

V.1.5 Wsparcie prac koncepcyjnych oraz projektowych poprzez konwersję cyfrowych danych geoprzestrzennych do formatu IFC (cyfrowych danych budowlanych)

Rozpatrując obecnie stosowane metody przekazywania informacji z domeny geoprzestrzennej do budowlanej widoczne są pewne braki. Wytwarzana formalna dokumentacja w toku budowlanego procesu inwestycyjnego, nierzadko analogowa, odnosi się głównie do reprezentacji dwuwymiarowej, co dla bezpośredniego wykorzystania

Zgodnie z opracowanym w toku prac schematem (Rys. 23), w celu eksportu danych geoprzestrzennych do formatu IFC, wymagane jest zmapowanie odpowiednich klas pomiędzy strukturami, zmapowanie stosowanych reprezentacji geometrycznych oraz analiza zapisu atrybutów czy też właściwości w poszczególnych zestawach właściwości.

Rozpatrując aspekt geometrii. *GES_PrzewodKanalizacyjny* jest reprezentowany przez krzywą dwuwymiarową oraz parametry średnicy lub wymiarów – poziomego oraz pionowego. Ponadto może mieć odniesienie do *GES_Rzedna*, co umożliwi stworzenie trójwymiarowej reprezentacji krzywej, w przypadku posiadania tych informacji. Następnie, bazując na opracowanym w toku prac schemacie Rys. 38, możliwe jest stworzenie reprezentacji już w samej strukturze IFC. W przypadku posiadania tylko wymiaru średnicy (atrybut), możliwe jest zastosowanie klasy *IfcSweptSolidDisk*, natomiast w przypadku atrybutów wymiaru poziomego oraz pionowego (kształt jajowy/eliptyczny przewodu), możliwe jest zamodelowanie tej informacji z wykorzystaniem *IfcSectionedSolidHorizontal*.

W przypadku danych dotyczących urządzeń (*GES_UrzadzeniaSiecKanalizacyjna*), reprezentacja w GML umożliwia zastosowanie punktu czy poligonu. Ponadto klasa może mieć odniesienie do rzędnej (*GES_Rzedna*), w tym rzędnej dołu oraz rzędnej góry, co umożliwia uzyskanie wysokości danego obiektu. W przypadku poligonu możliwe jest zastosowanie reprezentacji takiej jak *IfcExtrudedAreaSolid*, poprzez wybranie poligonu jako profilu (np. *IfcArbitraryClosedProfileDef*) oraz wyciągnięcie do góry o zdefiniowaną wysokość. Jednakże jest to reprezentacja zakładająca brak zróżnicowania wysokościowego bryły. Co więcej, w przypadku urządzeń reprezentowanych przez punkt, schemat GML nie daje możliwości zdefiniowania średnicy urządzenia. Możliwe jest tylko zawarcie informacji o jego kształcie (np. owalny, kwadratowy czy okrągły), lecz jest to informacja nie pozwalająca na geometryczne zamodelowanie obiektu w formie trójwymiarowej. Wynika to z zapisu w (Rozporządzenie Ministra Rozwoju, Pracy i Technologii z dnia 23 lipca 2021 r. W sprawie geodezyjnej ewidencji sieci uzbrojenia terenu, 2021), który pozwala na reprezentację punktową dla obiektów o średnicy równej lub poniżej 0.75m. Dla takich reprezentacji, wydaje się, że podczas konwersji należy więc przyjąć średnicę obiektu równą maksymalnej (0.75m). Aby zamodelować tego typu urządzenie, możliwe jest stworzenie np. klasą *IfcCircle* kształtu owalnego, a następnie z wykorzystaniem *IfcExtrudedAreaSolid* zamodelowanie reprezentacji trójwymiarowej. Na podstawie powyższych analiz, widoczne są bariery w pojemności informacyjnej stosowanego standardu, które limitują możliwość konwersji, w szczególności do wyższych poziomów szczegółowości.

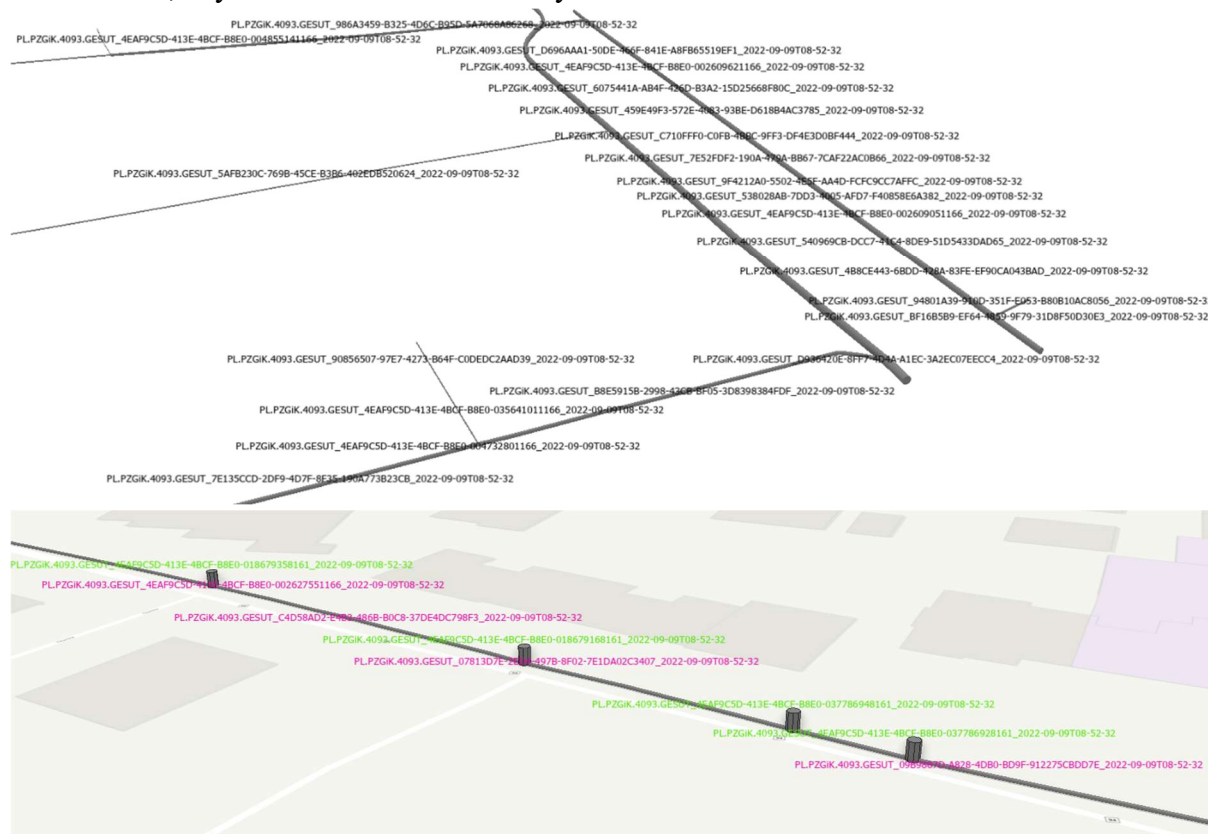
Analizując kwestie semantyki, dla celów zamodelowania przewodów kanalizacyjnych możliwe jest wykorzystanie klasy *IfcPipeSegment*, natomiast dla urządzeń sieci kanalizacyjnej *IfcDistributionChamberElement*. Co więcej, w przypadku zidentyfikowania relacji pomiędzy przewodem oraz urządzeniem, możliwe jest zamodelowanie tej informacji poprzez *IfcDistributionPort*, a następnie zdefiniowanie poszczególnych rodzajów przewodów w postaci klasy *IfcDistributionSystem* (np. dla poszczególnych typów przewodów kanalizacyjnych) oraz zebranie całości sieci w postaci *IfcSystem*. Jednakże w samej strukturze GESUT GML brak jest definicji relacji pomiędzy przewodem, a urządzeniem. Aby stworzyć takowe, wymagane byłoby więc przeprowadzenie analiz geoprzestrzennych.

Ostatni z elementów to mapowanie atrybutów czy właściwości obiektu. Pierwszy element, który może zostać zapisany do zestawu właściwości *Pset_Uncertainty* to dane

dotyczące źródła oraz ewentualnych kwestii dotyczących niepewności geometrii z tego wynikających. Aktualny stan obiektu może zostać zapisany poprzez *Pset_Condition*. Ponadto informacje wprost dotyczące danych z GML (jak np. identyfikator) mogą zostać zapisane w *Pset_ConstructionAdministration*. W przypadku urządzeń sieci kanalizacyjnych możliwe jest również opisanie szczegółowo rodzaju urządzenia poprzez odniesienie do atrybutu *PredefinedType* (np. *MANHOLE* dla studzienek kanalizacyjnych). Ponadto każdy z typów przewodów np. główny bądź przyłącza może również zostać opisany w ramach poszczególnych systemów (*IfcDistributionSystem* lub *IfcSystem*).

Analiza pojemności informacyjnej GML, stosowanego w ramach GESUT i sieci kanalizacyjnych, ujawnia istotne ograniczenia w odwzorowaniu trójwymiarowych obiektów na wyższych poziomach szczegółowości, szczególnie w przypadku urządzeń kanalizacyjnych. Jednakże rozpatrując holistycznie problem, według autora, nie stanowi wyzwania technologicznego sama konwersja do formatu IFC, co zostało potwierdzone poprzez przeprowadzone badania. Ograniczeniem jest tylko pojemność informacyjna.

Poniżej został przedstawiony efekt konwersji urządzeń oraz przewodów kanalizacyjnych funkcji typu główny do formatu IFC wraz z przypisaną nazwą w postaci *gml_id* (Rys. 67). Konwersja została wykonana na podstawie zaimplementowanego w toku prac cyfrowego narzędzia wspierającego. Jako dane testowe wykorzystano dane realne z zasobu geodezyjnego GESUT dla terenu AGH w Krakowie, uzyskane dla celów badawczych.



Rysunek 67 Przykładowe rezultaty konwersji danych geoprzestrzennych GESUT – przewody oraz urządzenia sieci kanalizacyjnej do IFC. U góry przewody kanalizacyjne wraz z przypisanym *gml_id*, u dołu urządzenia oraz przewody kanalizacyjne – na fioletowo *gml_id* dla urządzeń; na zielono *gml_id* dla przewodów

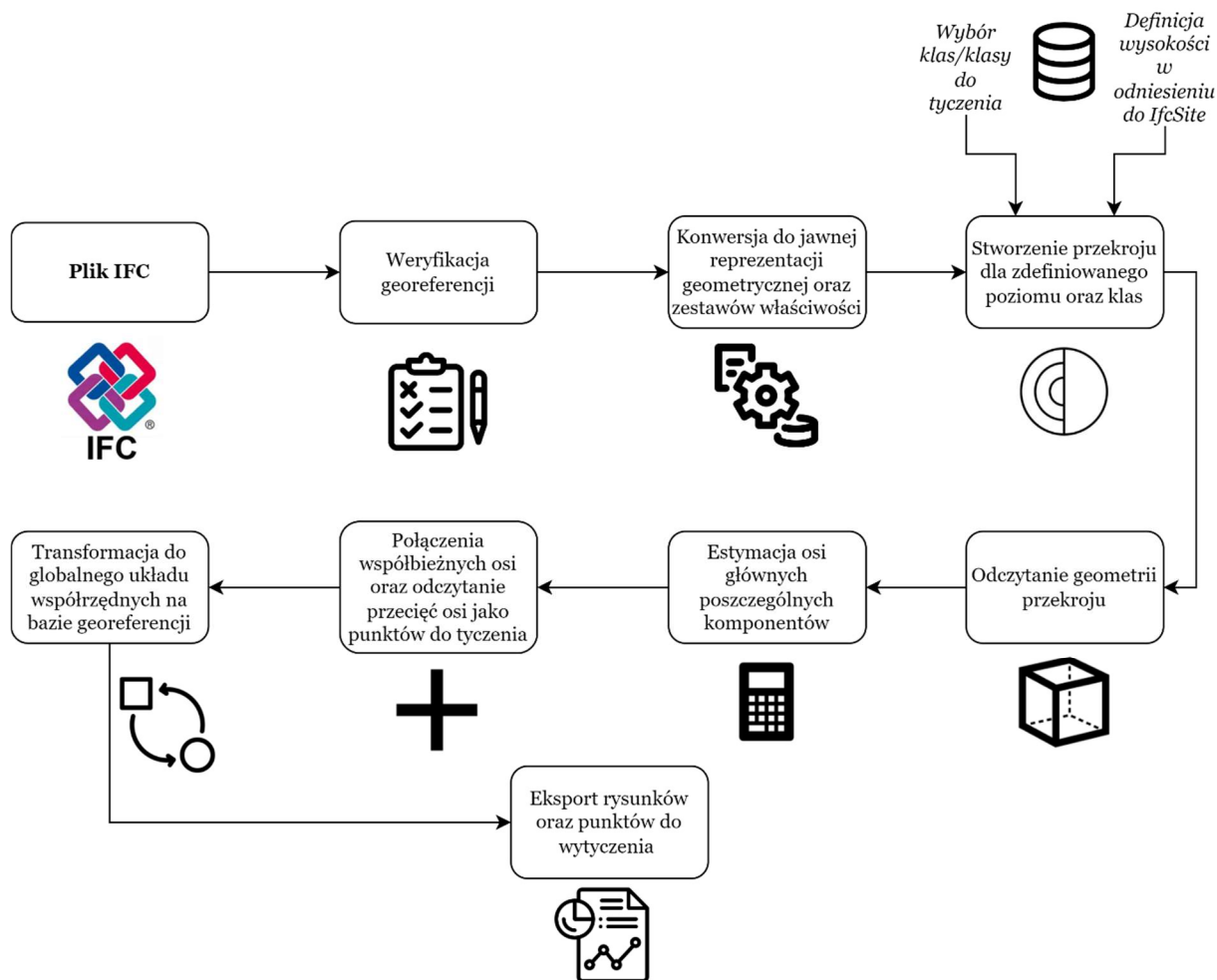
Podsumowując, przejście z reprezentacji GML do IFC nie stanowi obecnie wyzwania i jest możliwe po odpowiednim zmapowaniu: geometrii, danych alfanumerycznych oraz semantyki. Jednakże problemem jest pojemność informacyjna w ramach stosowanych schematów stosowanych dla zasobów geodezyjnych. W celu budowy komplementarnych rozwiązań dostosowanych do technologii BIM, wymagana byłaby więc restrukturyzacja metod prowadzenia cyfrowych zasobów geodezyjnych.

V.1.6 Automatyzacja pozyskiwania danych do tyczenia obiektu dla wsparcia zadań inżyniera geodety

Kolejny z omawianych przykładów zastosowania dotyczy automatyzacji prac związanych z pozyskaniem danych do tyczenia bezpośrednio z modelu. Przypadek został rozbity na dwa obszary: pierwszy dotyczący obiektów kubaturowych oraz drugi dotyczący obiektów infrastrukturalnych.

Proces tyczenia obiektu, jest standardowym działaniem inżyniera geodety w ramach budowlanego procesu inwestycyjnego na etapie wznoszenia obiektu. W tradycyjnym ujęciu proces ten jest poprzedzony geodezyjnym opracowaniem projektu, na bazie którego powstają szkice dokumentacyjne potrzebne do wytyczenia obiektu. Bazą do jego realizacji w tradycyjnym ujęciu mogą być pliki CAD czy PDF. W ramach badań zostanie przeanalizowana oraz zaimplementowana w formie cyfrowych narzędzi wspierających możliwość realizacji powyższych procesów z wykorzystaniem semantycznych struktur formatu IFC.

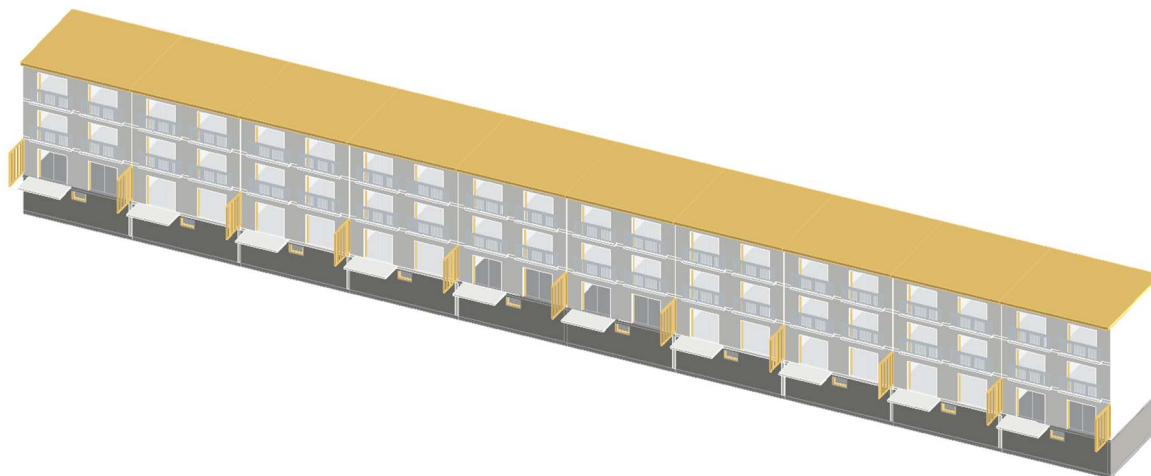
Analizując obiekty kubaturowe, w ramach opracowanego rozwiązania (Rys. 68) najpierw wczytywany jest plik oraz weryfikowana jest georeferencja. W przypadku stwierdzenia jej braku, niemożliwe jest przeprowadzenie procesów generowania danych do tyczenia w sposób automatyczny. Następnie przetwarzana jest geometria do reprezentacji jawnej na podstawie algorytmu opisanego w IV.5.1 oraz odczytywane są zestawy właściwości. Następnie, dla zdefiniowanej wysokości oraz klas, względem układu modelu np. poziomu zero zdefiniowanego w ramach klasy *IfcSite*, tworzony jest przekrój na podstawie zaimplementowanego w toku prac narzędzia bazującego na bibliotece *OpenCascade*. Kolejnym krokiem jest przeprowadzenie ekstrakcji osi dla zdefiniowanych elementów. Następnie osie są analizowane pod względem pokrycia i tworzone są osie główne dla całego obiektu na danym poziomie wysokości. W kolejnym kroku odczytywane są punkty przecięcia osi obiektów jako miejsca do wytyczenia. Możliwa jest również ekstrakcja wewnętrznych lub zewnętrznych obrysów, wtedy punkty są odczytywane bezpośrednio na podstawie przecięcia (przekroju), bez ekstrakcji osi. Końcowym etapem prac jest przetworzenie (transformacja) uzyskanych danych do globalnego układu współrzędnych na bazie zdefiniowanej w pliku georeferencji.



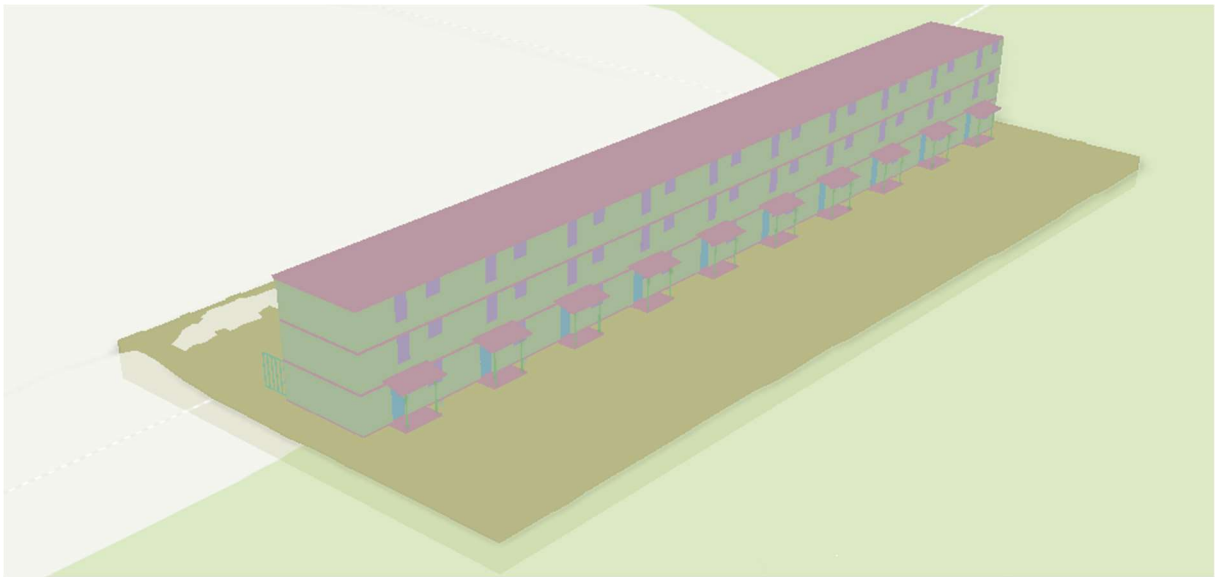
Rysunek 68 Schemat automatycznego generowania danych do tyczenia dla obiektów kubaturowych

Poniższy model testowy został pozyskany z otwartego repozytorium (KIT, 2024) (Rys. 69; Rys. 70). Dodano do niego georeferencję, tak aby obiekt był umieszczony na terenie Krakowa.

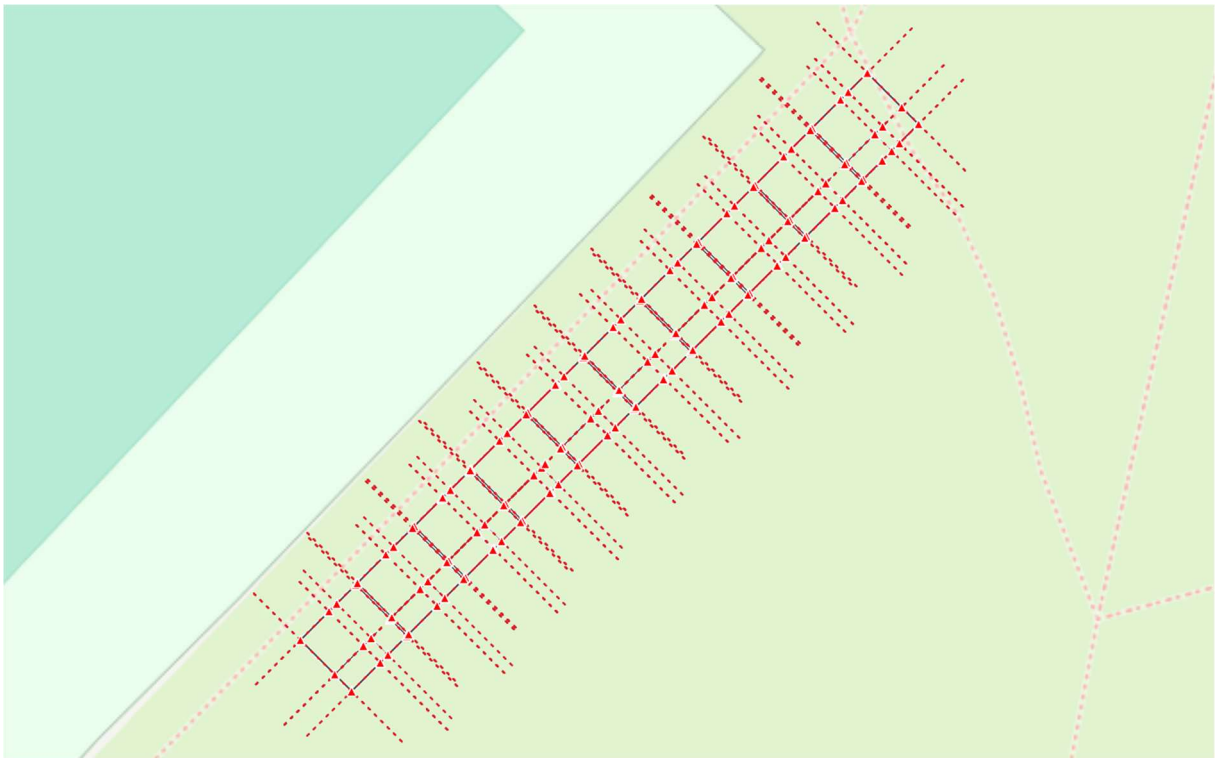
Dla celów przedstawienia przykładowego scenariusza jako klasę, która ma zdefiniować osie obiektu wybrano *IfcWall*, natomiast przykładowa wysokość jaką ustalono to 0.1 metra (względem przyjętej wysokości dla klasy *IfcSite*). Efekt działania algorytmu został przedstawiony poniżej na rysunkach (Rys. 71; Rys. 72).



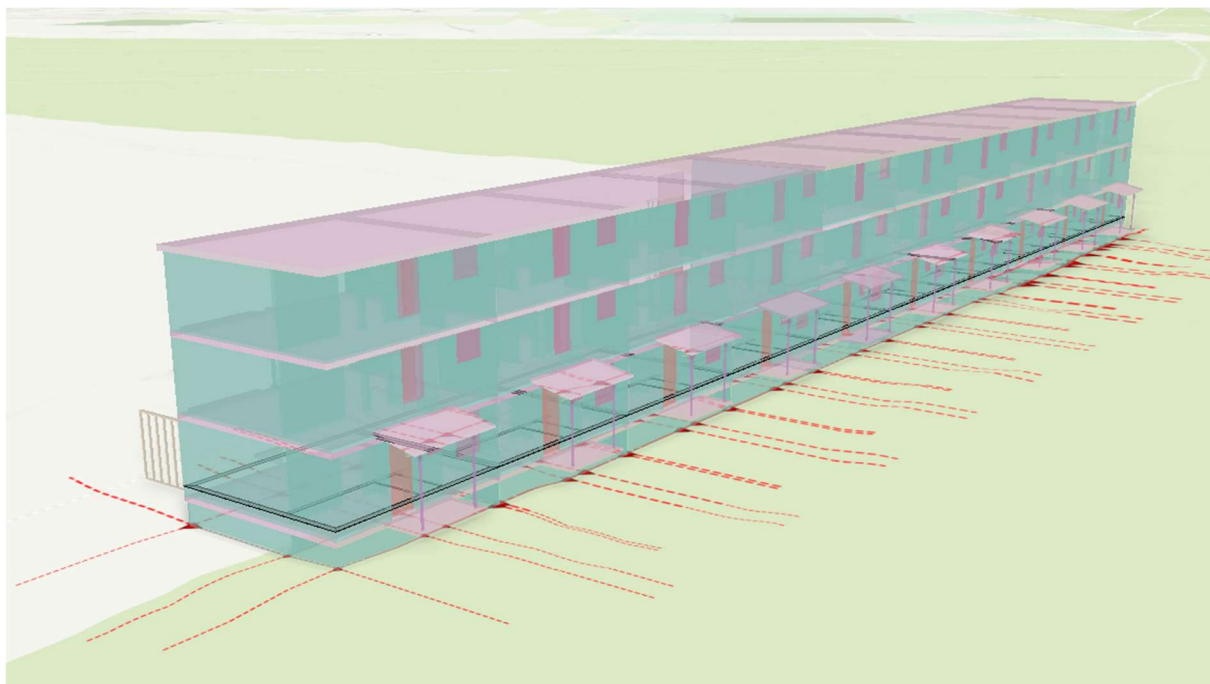
Rysunek 69 Plik testowy dla celów automatycznego wygenerowania danych do tyczenia (KIT, 2024)



Rysunek 70 Model testowy w kontekście geoprzestrzennym

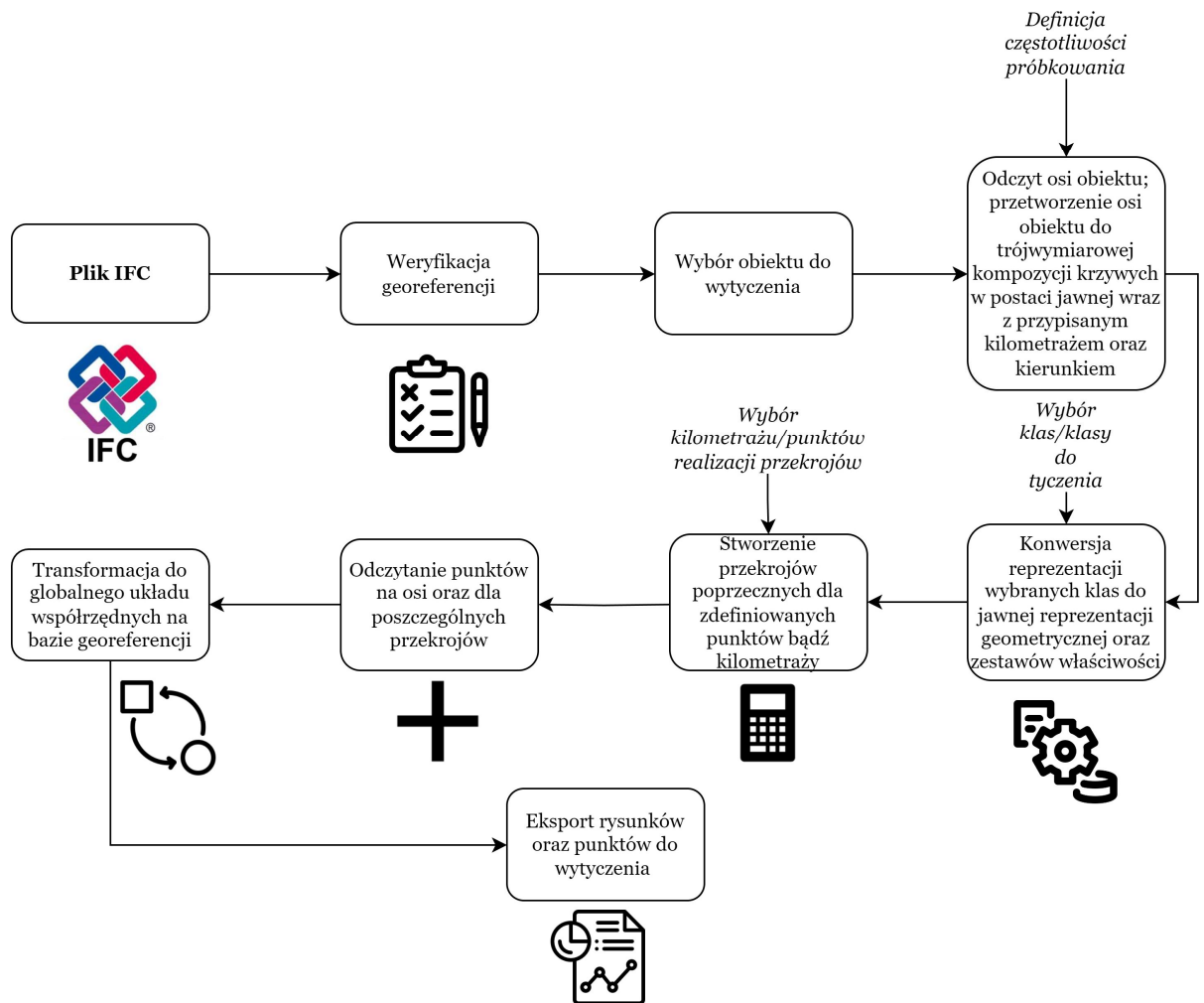


Rysunek 71 Osie modelu testowego oraz przecięcia osi dla klasy IfcWall na wysokości 0.1m



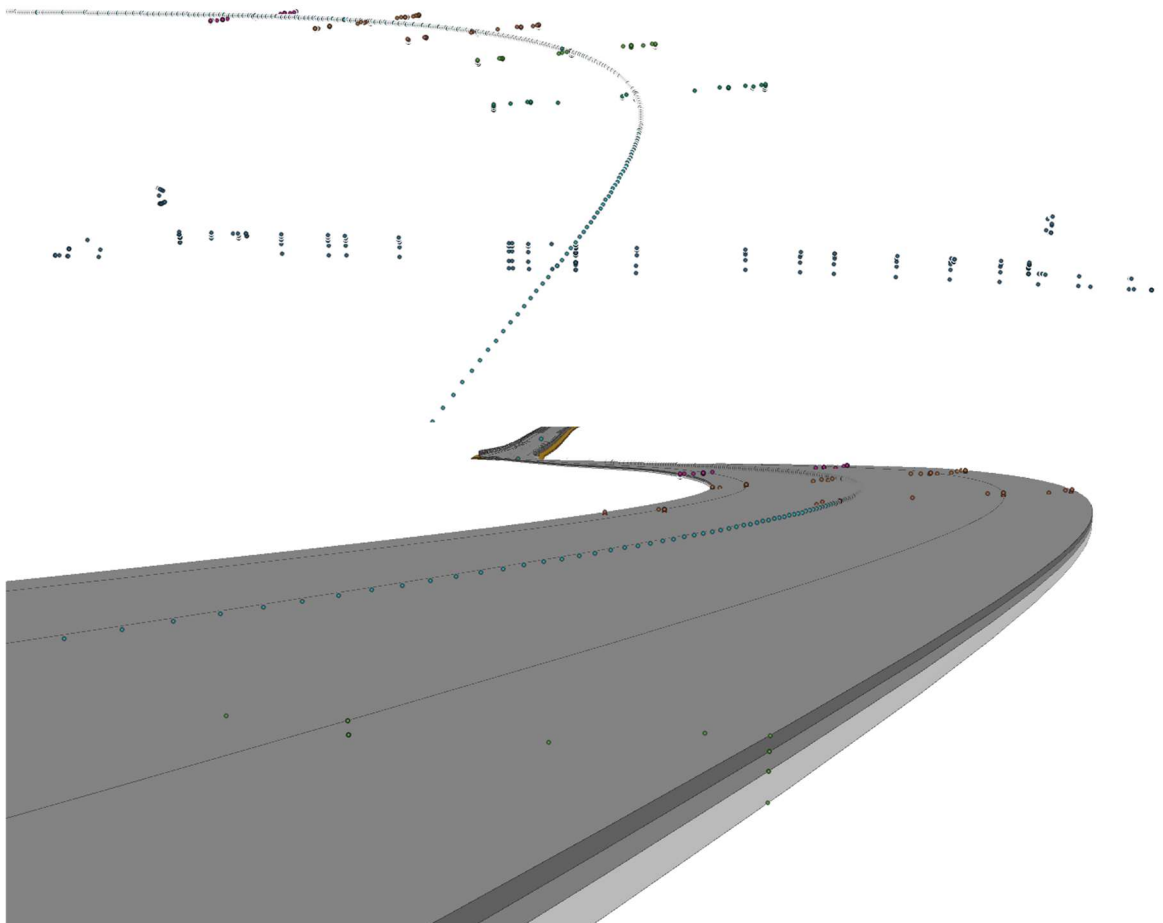
Rysunek 72 Nałożenie modelu oraz uzyskanych osi i punktów przecięć (punktów do tyczenia)

Z drugiej strony, projekty infrastrukturalne mają nieco inną charakterystykę oraz wymagania co do procesu wyniesienia obiektu w terenie. Po pierwsze wymagana jest znajomość osi obiektu infrastrukturalnego. W tym celu wykorzystano algorytm opisany w sekcji IV.5.2. Następnie złożono niweletę oraz profil horyzontalny, w celu uzyskania reprezentacji trójwymiarowej. W ten sposób, ze zdefiniowaną częstotliwością możliwe jest wyznaczenie punktów do tyczenia na osi. Co więcej, możliwe jest również określenie miejsca zmiany krzywych (rozpoczęcie oraz zakończenie). Całość przetworzono do postaci umożliwiającej odczytanie współrzędnych na podstawie kilometrażu trasy. Poniżej przedstawiono całościowy schemat opracowanego w toku prac rozwiązania (Rys. 73).

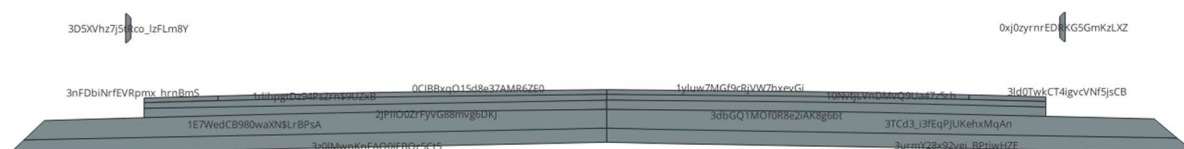


Rysunek 73 Schemat automatycznego generowania danych do tyczenia dla obiektów infrastrukturalnych

Następnie uzyskano również reprezentację jawną dla całego obiektu na podstawie algorytmu opisanego w IV.5.1 oraz opracowano algorytm umożliwiający tworzenie przekroju poprzecznego w zdefiniowanych punktach osi, prostopadłe do jej kierunku w danym punkcie. W ten sposób uzyskano reprezentacje punktową (punkty do tyczenia) oraz, w celu wizualizacji, szkic w formie poligonów reprezentujących np. poszczególne warstwy, których właściwości mogą zostać odczytane poprzez odniesienie do *GlobalId*. Uzyskane rezultaty dla modelu testowego (buildingSMART, 2024d) zostały przedstawione poniżej (Rys. 74; Rys. 75).



Rysunek 74 Przykładowo wyglądający przebieg osi infrastruktury oraz punkty uzyskane z przekrojów



Rysunek 75 Schemat przykładowego przekroju poprzecznego wraz z odniesieniem do identyfikatora *GlobalId* poszczególnych warstw

Kolejno, istnieje możliwość eksportu współrzędnych do postaci tabelarycznej (np. *.csv*) oraz wgrania do urządzenia, którym ma być realizowane zadanie.

Ponadto, możliwy jest dalszy rozwój algorytmów np. o moduł do planowania osnowy realizacyjnej na bazie modelu IFC oraz różnego rodzaju symulacji parametrów dokładnościowych takich sieci czy oceny wizury. Co więcej, istnieje możliwość połączenia tych informacji z zamodelowanymi elementami w ramach schematu IFC. Zidentyfikowano dwa zestawy właściwości, które mogą wspomóc wybór metod pomiarowych oraz potrzebną dokładność. W wersji IFC 4x3, do komponentów możliwe jest przypisanie takich zestawów właściwości jak *Pset_Tolerance* oraz *Pset_Uncertainty*. Z ich wykorzystaniem możliwe jest zamodelowanie informacji o potrzebnej dokładności dla poszczególnych komponentów czy niepewnościach związanych z zrealizowanym procesem tyczenia.

W ramach analizowanego przykładu zastosowania potwierdzono możliwość automatycznego generowania danych do tyczenia obiektów kubaturowych oraz

infrastrukturalnych poprzez opracowanie algorytmów oraz implementacje cyfrowych narzędzi wspierających.

V.1.7 Analiza postępu prac budowlanych poprzez połączenie cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych

Niniejszy przykład zastosowania ma charakter nieco bardziej koncepcyjny, aniżeli jest gotowym rozwiązaniem problemu. Wynika to przede wszystkim z uwarunkowań i braku możliwości stworzenia oraz przetestowania idei na realnym przykładzie, co jest spowodowane niedostateczną implementacją różnych elementów wymaganego procesu w otoczeniu społeczno-gospodarczym w Polsce. Dlatego też w ramach opisu zostanie przedstawiona koncepcja rozwiązania oraz omówione zostaną przykładowe dane umożliwiające w sposób automatyczny na monitorowanie postępu prac budowlanych obiektów infrastrukturalnych poprzez połączenie satelitarnych danych teledetekcyjnych oraz danych BIM 4D (model BIM wraz z zamodelowanym harmonogramem). Opis zostanie wykonany na bazie artykułu będącego obecnie w recenzji (Glinka, 2024), który na podstawie badań literaturowych proponuje koncepcję rozwiązania Sat4BIM4D.

Monitorowanie postępu prac budowlanych jest problematyką dość często pojawiającą się w badaniach naukowych. Jednakże przedmiotem większości tych badań są obiekty kubaturowe, dla których śledzenie postępu prac budowlanych realizowane jest na podstawie danych pozyskanych metodami fotogrametrycznymi, skaningu laserowego czy poprzez różnego rodzaju sensory takie jak np. RFID (Glinka, 2024). W przypadku obiektów infrastrukturalnych jako medium przenoszące narzędzie pomiarowe często wykorzystywane są BSL. Na bazie danych pomiarowych opracowywane są algorytmy oraz metody przetwarzania danych umożliwiające określenie postępu prac budowlanych. Bazują one najczęściej na rozwiązaniach z zakresu fotogrametrii, Wizji Komputerowej, Uczenia Maszynowego czy zastosowaniu Głębokiego Uczenia Maszynowego dla celu ekstrakcji określonych informacji (np. detekcja, klasyfikacja, segmentacja, ekstrakcja cech). Ponadto podejmowane są próby połączenia informacji na temat postępu prac budowlanych z otwartymi standardami BIM, jednakże jest to obszar nie do końca zbadany, w szczególności dla najnowszej wersji formatu IFC 4x3. Co więcej, brak jest najczęściej możliwości automatyzacji procesu śledzenia postępu prac, co wynika, z tego, że każda z powyżej opisanych metod pomiarowych, najczęściej, wymaga operatora, który dokona akwizycji danych, a następnie przetworzy je do produktów umożliwiających analizę, która w niektórych przypadkach jest przeprowadzana już automatycznie. Rozpatrując aspekt dotyczący przedmiotu badań, zdecydowanie więcej rozwiązań skupia się na obiektach kubaturowych. W badaniach ponadto nie zidentyfikowano rozwiązań, które umożliwiają w sposób automatyczny i w powiązaniu ze standardami otwartymi na monitorowanie postępu prac budowlanych w oparciu o satelitarne zobrazowania teledetekcyjne.

W ramach niniejszej sekcji, zostały przeanalizowane poszczególne elementy koncepcji Sat4BIM4D opisanej w (Glinka, 2024), w szczególności w ujęciu projektów infrastrukturalnych oraz zastosowaniu standardów otwartych. Koncepcja została przedstawiona na Rys. 76. Ponadto zostały przeprowadzone badania danych otwartych (zobrazowania satelitarne oraz ortofotomapy) w celu identyfikacji informacji, które mogą podlegać ekstrakcji dla różnych rozdzielczości przestrzennych.

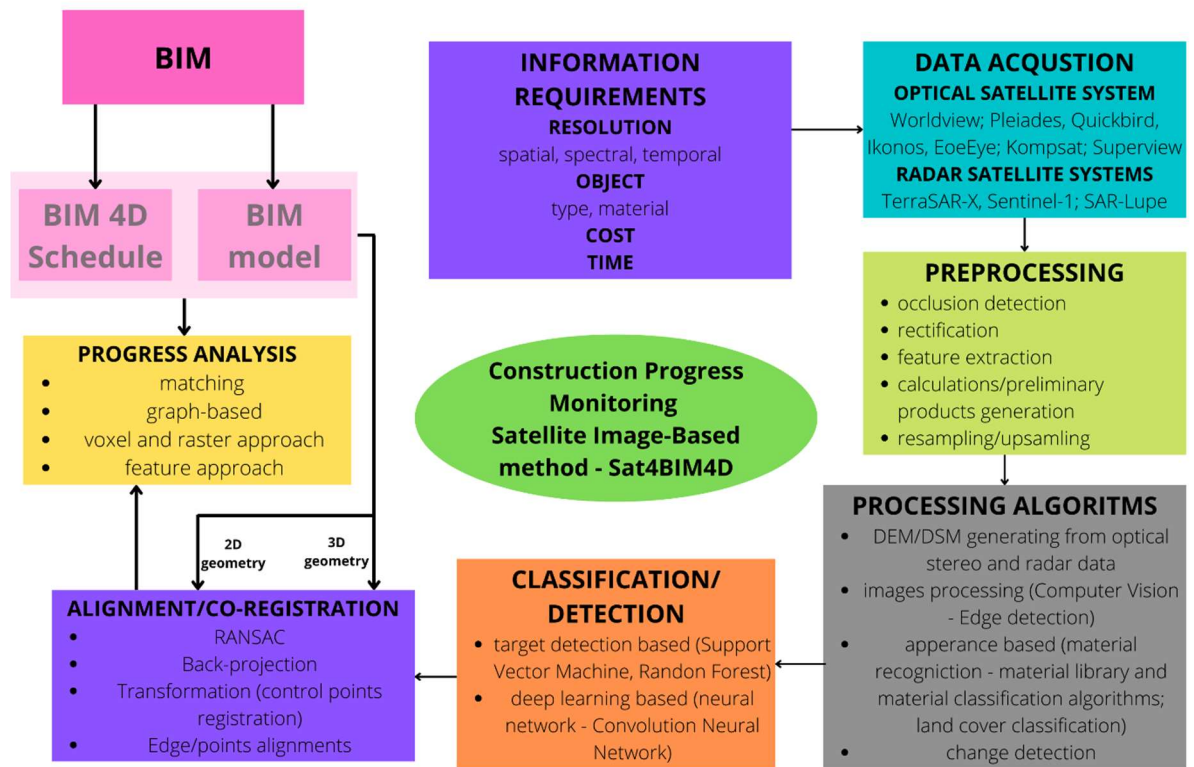
Można wyróżnić dwa podstawowe źródła danych teledetekcyjnych z pałapu satelitarnego, które mogą posłużyć jako baza do śledzenia postępów prac: satelity obrazujące z wykorzystaniem sensorów optycznych oraz te posiadające sensor aktywny – radarowy. Dla celów monitorowania postępów prac budowlanych, na podstawie przeprowadzonych analiz, wydaje się, że powinno się stosować oba te źródła jednocześnie. Jest tak z dwóch głównych powodów: po pierwsze są one w pewnym stopniu komplementarne oraz, po drugie, dane radarowe stanowią pewnego rodzaju bufor bezpieczeństwa, ponieważ są niemal niezależne od warunków atmosferycznych w przeciwieństwie do sensorów optycznych. Należy więc, dla celów śledzenia postępów prac, rozpatrywać te technologie łącznie i, w przypadku takiej możliwości, opierać rozwiązania o wspólne ich przetwarzanie (fuzja danych).

Rozpatrując rozdzielczości, dostępne komercyjnie rozwiązania dają możliwość obrazowania z pikselem terenowym nawet poniżej 30 cm, przy rewizycie kilkunastokrotnej w ciągu dnia np. konstelacje firmy Maxar czy Iceye. Tak więc, możliwe jest otrzymywanie danych niemal w czasie rzeczywistym. Ponadto rejestracja dla sensorów optycznych odbywa się dla wielu kanałów spektralnych, co umożliwia przeprowadzanie bardziej dogłębnych analiz. Z drugiej strony problemem są kwestie ekonomiczne. Na ten moment, dane tego typu są stosunkowo drogie, co może negować uzasadnienie ekonomiczne stosowania proponowanego rozwiązania. Jednak w perspektywie kolejnych lat, wraz z rozwojem sensorów i ich liczby oraz zwiększeniem konkurencyjności jest możliwy spadek cen za zobrazowania teledetekcyjne. Z drugiej strony dostępne są również rozwiązania o niższej rozdzielczości, w szczególności przestrzennej, które są tańsze lub nawet są udostępniane bez konieczności uiszczania opłat (np. w ramach programu Copernicus). W związku z tym, wybór odpowiedniego źródła danych zależy od docelowego zastosowania oraz dostępnych zasobów, co wpływa na określenie wymagań dotyczących procesu, takich jak wymagana rozdzielczość docelowej informacji oraz parametrów danych wejściowych.

Kolejny element dotyczy wstępnego przetworzenia danych, który polega na np. ortorektyfikacji, zwiększeniu rozdzielczości (*ang. super resolution*), przeprowadzeniu procesu fuzji danych, wykryciu elementów przeszkadzających w analizie czy ekstrakcji cech charakterystycznych. Następnie możliwa jest analiza już w ramach samego silnika przetwarzającego. Algorytmy tutaj stosowane mogą być zróżnicowane. Od prób generowania NMPT czy NMT (na podstawie pary zobrazowań czy też map głębi (*ang. depth map*)), przez detekcję zmian pomiędzy kolejnymi punktami historii czy analizowanie pokrycia terenu i detekcję obiektów, po wykorzystaniem narzędzi wizji komputerowej do ekstrakcji określonych cech np. krawędzi. W kolejnym kroku możliwe jest przeprowadzenie dalszych działań związanych z klasyfikacją np. typów zmian czy też detekcją.

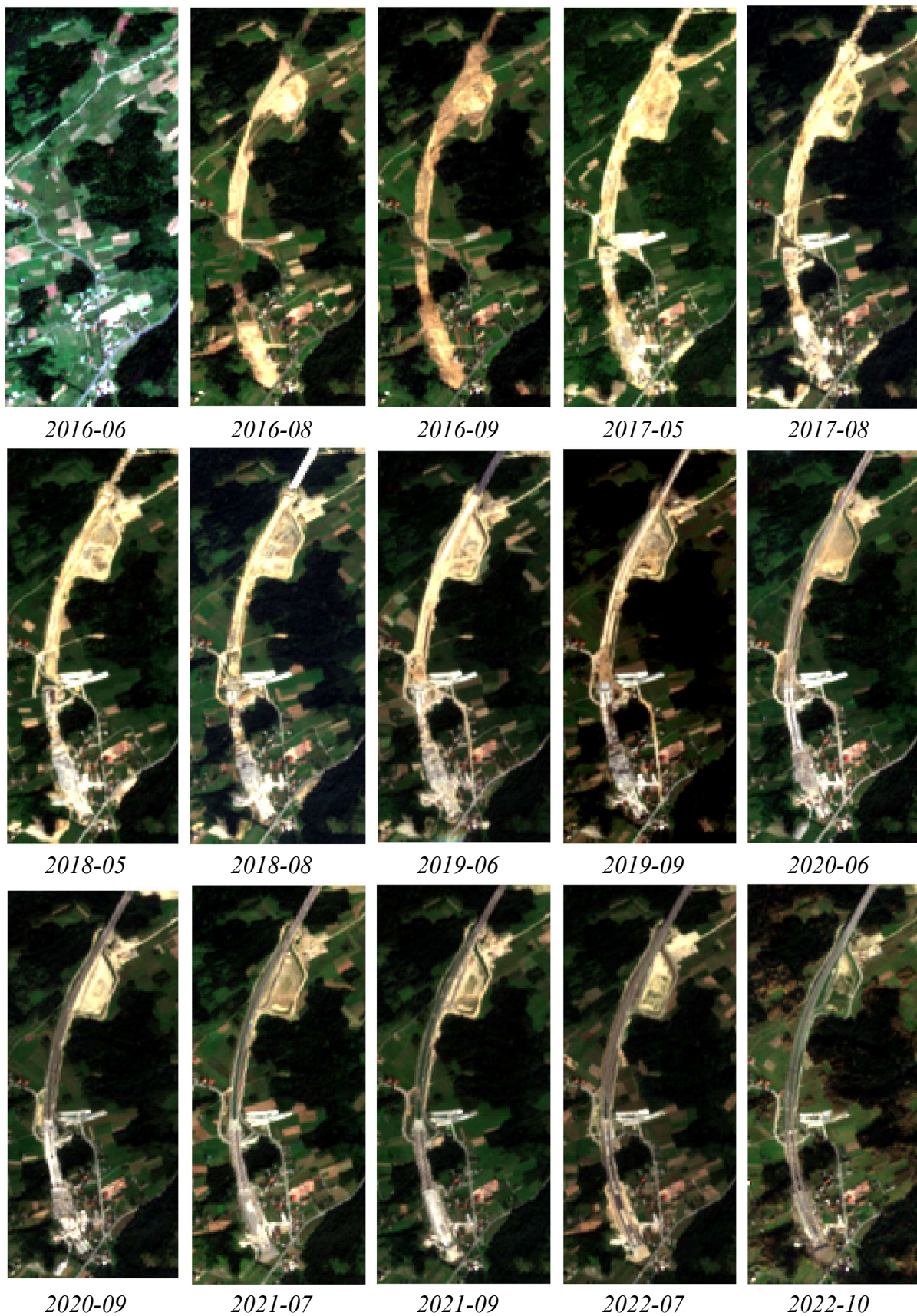
W celu weryfikacji postępu prac np. z harmonogramem zdefiniowanym w ramach BIM (BIM 4D) wymagane jest więc połączenie wytworzonych produktów z samym modelem. W tym celu proponowane są do zastosowania algorytmy, które w głównej mierze są determinowane przez rodzaj i typ produktu, na bazie którego prowadzone były analizy. Algorytmy te dotyczą przede wszystkim połączenia oraz współrejestracji (*ang. coregistration*) cyfrowych danych budowlanych oraz uzyskanych produktów. W tym celu możliwe są do zastosowania różnego rodzaju algorytmy typu *matching* czy oparte na projekcji wstecznej. Ostatnim krokiem jest już stricte analiza harmonogramu oraz postępu prac na bazie BIM 4D. W przypadku stosowania otwartych standardów BIM, w ramach EIR należy zdefiniować

elementy cyfrowych danych budowlanych, które mają zostać zamodelowane zgodnie ze schematem IFC, ze szczególnym uwzględnieniem aspektów związanych z harmonogramem. Struktura klas umożliwiająca zamodelowanie tych informacji została przedstawiona na Rys. 41 w sekcji IV.6. Ponadto dla obiektów infrastrukturalnych, powinny zostać opisane wymagania dotyczące np. opisu oraz zamodelowania poszczególnych warstw obiektu (w ramach klasy *IfcCourse*).



Rysunek 76 Koncepcja systemu umożliwiającego monitorowanie postępu prac budowlanych na podstawie zdjęć satelitarnych (Glinka, 2024)

Poniżej zostały zaprezentowane przykładowe zobrazowania Sentinel-2 (produkt L2A) obejmujące realizowany w latach 2016-2022 fragment drogi S7 Naprawa – Skomielna Biała w km od ok. 721+170 do ok. 724+220 wraz z budową tunelu. Szczegółowo przeanalizowano obszar północnego wlotu do tunelu. Na zobrazowaniach zostały zaprezentowane zmiany wizualne. W celu pobrania danych wykorzystano openEO API, umożliwiające bezpośrednie pobranie danych z zasobów programu Copernicus. Rozdzielczość uzyskanych obrazów to 10 metrów. Czas pobrania danych dla zdefiniowanego okresu oraz obszaru wyniósł około 10 minut. Wybrano zobrazowania, tylko te, których pokrycie chmurami wynosi maksymalnie 5%. W sumie z lat 2016-2022 pobrano 52 zobrazowania w cyklu miesięcznym (spełniające warunek maksymalnego pokrycia chmurami 5%). Poniżej zostały zaprezentowane wybrane zobrazowania z danego okresu (Rys. 77).

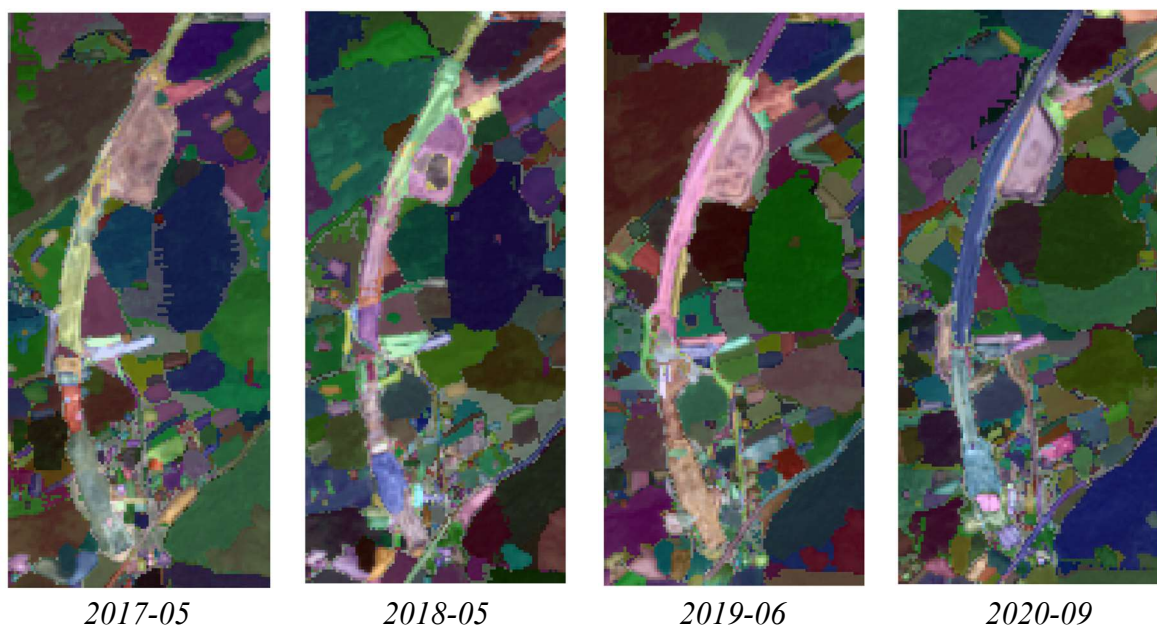


Rysunek 77 Zmiany wizualne obrazujące postęp prac budowlanych na podstawie zobrażeń Sentinel-2 dla budowy fragmentu drogi ekspresowej S7 Naprawa – Skomielna Biała w okolicach północnego wlotu do tunelu (okres 2016-2022)

Analizując poszczególne zobrażenia widoczna jest możliwość analizy zmian pokrycia terenu, co może być wskaźnikiem dla identyfikacji rodzaju wykonywanych prac. Ponadto możliwa jest identyfikacja obszarów oraz obiektów o wielkości odpowiadających rozdzielczości zobrażenia (czyli około 10 metrów). Co więcej możliwe jest zagęszczenie pozyskiwanych danych, jednakże z uwagi na rozdzielczość czasową (konstelacja dwóch satelitów optycznych) może być to maksymalnie 5 dni.

W celu wizualizacji powyżej opisanych możliwości wykorzystano rozwiązanie *segment-geospatial* (Q. Wu & Osco, 2023), bazujące na architekturze Głębokich Sieci Neuronowych *Segment Anything* (Kirillov i in., 2023) umożliwiające automatyczną klasteryzację czy segmentację obiektów na zobrażeniach. W celu wykorzystania powyższych narzędzi, zobrażenia zostały przekształcone do postaci RGB oraz 8-bitowej rozdzielczości radiometrycznej. Ponadto w celu uzyskania najlepszych rezultatów, eksperymentalnie wybrano parametry przetwarzania. Poniżej zostały przedstawione rezultaty działania algorytmu dla wybranych zobrażeń Rys. 78.

Na podstawie analizy poszczególnych segmentów, ich klasyfikacji, istnieje następnie możliwość analizy zmian zachodzących na danym obszarze, w szczególności w pokryciu terenu.



Rysunek 78 Segmentacja zobrażenia z wykorzystaniem narzędzia *segment-geospatial*

Rozpatrując aspekt rozdzielczości spektralnej istnieje również możliwość obliczenia wskaźników teledetekcyjnych w celu identyfikacji np. zmian w pokryciu terenu czy wegetacji.

Dla celów dalszych analiz pozyskano ortofotomapę o pikselu terenowym równym 0.25m dla zdefiniowanego obszaru z zasobów GUGiK, która może zasymulować dostępne komercyjnie zobrażenia o najwyższej rozdzielczości. Poniżej przedstawiono pobrane (Rys. 79) dane dla obszaru odpowiadającego danym przedstawionym na Rys. 77. Ponadto, dla celów porównawczych zestawiono zobrażenia satelitarne oraz ortofotomapę dla tego samego obszaru oraz przedstawiono efekt działania segmentacji dla ortofotomapy (Rys. 80).



2018-05

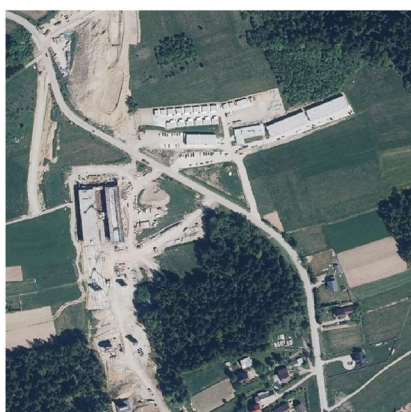


2019-09



2022-06

Rysunek 79 Zmiany wizualne na podstawie ortofotomapy dla budowy fragmentu drogi ekspresowej S7
Naprawa – Skomielna Biała w okolicach północnego wlotu do tunelu (okres 2016-2022)



2018-05



2019-09



2022-06

Rysunek 80 Porównanie zobrazowań Sentinel-2 (rozdzielczość 10 metrów) – po lewej oraz ortofotomapy (rozdzielczość 0.25m) – po środku dla tego samego obszaru oraz podobnego czasu akwizycji. Segmentacja obiektów/obszarów z wykorzystaniem segment-geospatial po prawej.

Na podstawie powyższych analiz, widoczna jest możliwość przeprowadzania procesu monitorowania postępu prac na większych poziomach ogólności dla danych otwartych np. weryfikacja zakresu przestrzennego robót, zmiany warstw itp.. Ponadto zaprezentowane dane (ortofotomapa) mogą być traktowana jako odpowiednik rozwiązań komercyjnych z zakresu teledetekcji satelitarnej pod względem rozdzielczości. Na bazie tego typu danych widoczne są już szczegółowe informacje, w tym nawet możliwość identyfikacji zmian w zagospodarowaniu terenu z dużą szczegółowością odpowiadającą rozdzielczości przestrzennej.

V.2 Optymalizacja budowlanego procesu inwestycyjnego realizowanego w technologii BIM

Optymalizacja budowlanego procesu inwestycyjnego może być rozpatrywana na wielu poziomach. Po pierwsze, w kontekście triady projektowej (koszt, czas, jakość), można przeprowadzać działania mające na celu redukcję czasu realizacji projektu, zredukowanie kosztów przy jednoczesnym zapewnieniu odpowiedniej jakości. Kolejnym kluczowym obszarem mogą być kwestie związane ze zrównoważonym rozwojem i redukcją wpływu na środowisko. Ponadto można wyróżnić kwestie związane z optymalizacją zasobów (w tym zasobów ludzkich), bezpieczeństwa, ryzyka czy procesów zarządzania informacją. Należy jednak podkreślić, że optymalizacje te mogą dotyczyć zarówno ogólnych działań projektowych, jak i specyficznych działań podejmowanych przez poszczególnych interesariuszy procesu inwestycyjnego. W efekcie, każda z tych optymalizacji przynosi korzyści w zdefiniowanych obszarach, wspierając osiągnięcie celów strategicznych lub operacyjnych przedsięwzięcia czy poszczególnych jednostek.

Aspekt optymalizacji procesów poprzez zastosowanie technologii BIM dla celów wsparcia budowlanych procesów inwestycyjnych jest szeroko omówiony w literaturze m.in. w (Song i in., 2012) czy (Ghaffarianhoseini i in., 2017) opisano korzyści jakie płyną z zastosowania BIM oraz opisano obszary optymalizacji.

Jednakże rozpatrując kwestie dotyczące Geodezyjnej Obsługi Inwestycji takowe analizy nie były prowadzone. Co więcej, ograniczona jest ilość publikacji mówiących o optymalizacji budowlanego procesu inwestycyjnego w kontekście integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych. Wynika to przede wszystkim

z nowości proponowanych rozwiązań oraz początkowych etapów wdrażania powszechnie tych technologii. Większość z zidentyfikowanych pozycji omawiających optymalizacje skupia się przede wszystkim na aspektach związanych z logistyką, czy to dostaw materiałów czy też logistyką placu budowy np. analiza i optymalizacja miejsca usytuowania magazynów lub żurawia wieżowego do prowadzenia robót budowlanych. Publikacje z tego zakresu były analizowane w sekcji III.3.2.4.

Z uwagi na braki w tym obszarze, w ramach badań przeanalizowano również aspekt optymalizacyjny opracowanych w ramach rozdziału IV i V przypadków zastosowania, algorytmów oraz cyfrowych narzędzi wspierających.

Rozpatrując zidentyfikowane przypadki zastosowania w sekcji V.1, właściwie każdy z nich umożliwia zakwalifikowanie do jakiegoś przedmiotu optymalizacji, ponieważ wspiera zdefiniowane procesy. Analizując na przykład standaryzację nazw w celu geolokalizacji projektu oraz standaryzacji wymiany informacji, rozwiązanie takie pozwala na jednoznaczne określenie zakresu danego dokumentu czy pliku oraz jego stanu. Natomiast poprzez zdefiniowanie kilometrażu oraz pozostałych parametrów umożliwiających na jednoznaczną lokalizację w ramach nazwy pliku, możliwe jest wsparcie procesów związanych z umiejscowieniem przedmiotowego projektu, a co jest tego efektem optymalizacja kwestii związanych z zarządzaniem informacją oraz zapewnienie jakości, również na poziomie organizacyjnym np. zarządzania portfelem projektów.

Analizując natomiast poszczególne zaimplementowane cyfrowe narzędzia wspierające oraz zrealizowane przykłady zastosowania widoczny jest znaczny wpływ na przeprowadzanie zidentyfikowanych procesów co jest wprost powiązane z optymalizacją. Rozpatrując każdy z elementów:

- Opracowane metody weryfikacji georeferencji umożliwiają wczesne wykrycie usterek modelu, pozwalając na usprawnienie procesów łączenia cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych, a także zapewnienie jakości informacji. Ponadto, możliwe jest wprowadzenie czynności naprawczych w celu poprawy georeferencji lub jej zmiany (transformacji).
- Wykorzystanie otwartych danych geoprzestrzennych może wspomóc procesy w ramach etapu przygotowania do inwestycji oraz tworzenia koncepcji. Dzięki ich wykorzystaniu możliwa jest optymalizacja kosztowa oraz redukcja marnotrawienia zasobów – zamiast opłat za wykonanie pomiarów, niemal ten sam zakres danych możliwy jest do uzyskania za darmo. Ponadto darmowe dane mogą wspomóc procesy analizy ryzyka i obniżyć jego poziom podczas realizacji inwestycji.
- Analiza kolizji optymalizuje proces koordynacji na etapie projektowania, dzięki czemu możliwe jest przesunięcie procesu podejmowania decyzji na wcześniejszy etap realizacji oraz uniknięcie kosztownych zmian projektowych w późniejszych fazach. Ponadto proces ten zapewnia uzyskanie odpowiedniej jakości modelu oraz umożliwia uzyskanie korzyści czasowych. Opracowany w ramach prac algorytm pozwala na realizację tego procesu w ujęciu integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych.
- Realizacja zadań związanych z optymalizacją kosztową dotyczyć może również wykorzystania cyfrowych danych geoprzestrzennych i budowlanych dla celów wariantowania inwestycji oraz obliczeń związanych z różnymi aspektami, w tym

na przykład kwestii związanych z procesem zajętości działek i wywłaszczeń w przypadku inwestycji infrastrukturalnych.

- Dostarczenie szczegółowych informacji, bezpośrednio z np. zasobu geodezyjnego w formie pozwalającej na wykorzystanie dla celów modelowania informacji w BIM wydaje się znacznym wyzwaniem. Poprzez dostarczenie narzędzi umożliwiających na przejście z domeny geoprzestrzennej do budowlanej możliwa jest znaczna optymalizacja aspektów związanych z zarządzaniem informacją, a co jest tego efektem, uzyskanie korzyści czasowych oraz finansowych. Ponadto w przypadku konwersji danych cyfrowych geoprzestrzennych w sposób automatyczny zapewniona może być odpowiednia jakość dostarczonych danych.
- Geodezyjne opracowanie danych, w tym wygenerowanie danych do tyczenia jest procesem czasochłonnym. Jednakże stosując do reprezentacji danych pliki oparte o semantykę, takie jak IFC, istnieje możliwość automatyzacji tego procesu oraz optymalizacji. Przykładowo, wygenerowanie danych do tyczenia dla budynku zaprezentowanego w sekcji V.1.6 z wykorzystaniem zaproponowanego podejścia zajmuje około 30 sekund. W przypadku stosowania standardowego podejścia opartego np. o techniki CAD proces ten jest zdecydowanie dłuższy. Ponadto, proces ten zapewnia jakość danych, ponieważ korzysta wprost z danych źródłowych.
- Ostatni z omawianych elementów, czyli wykorzystanie teledetekcji satelitarnej dla celów śledzenia postępu prac również ma potencjał optymalizacyjny, związany z kwestiami umożliwiającymi kontrolę harmonogramu oraz, co powiązane, kosztów.

Ponadto wykorzystanie otwartych standardów dla celów integracji cyfrowych danych budowlanych i geoprzestrzennych również może być rozpatrywane przez pryzmat optymalizacji komunikacji oraz realizacji procesów demokratyzacji danych.

Należy jednak zaznaczyć, że w celu obliczenia szczegółowych parametrów optymalizacji wymagane są dalsze badania, w szczególności na realnych projektach. Poszczególne metryki optymalizacji mogą zostać obliczone na podstawie metodyk optymalizacji procesów oraz aparatów matematycznych. Na obecny moment implementacji procesów integracji cyfrowych danych geoprzestrzennych oraz budowlanych w Polsce realizacja tego typu badań jest trudna do zrealizowania.

ROZDZIAŁ VI. Wnioski

Poniżej w punktach zebrano wnioski wynikające z przeprowadzonych badań w ramach niniejszej pracy.

- W ramach przeprowadzonych badań potwierdzono możliwość opracowania algorytmów oraz efektywnego zastosowania zaimplementowanych na ich bazie cyfrowych narzędzi wspierających różnorodne zadania związane z integracją i konwersją danych geoprzestrzennych oraz budowlanych. W szczególności, narzędzia te umożliwiają wsparcie procesów związanych z Geodezyjną Obsługą Inwestycji (GOI), co przekłada się na usprawnienie kluczowych działań w zakresie zarządzania informacją przestrzenną na różnych etapach realizacji inwestycji oraz wsparcie działań inżyniera geodety.
- Analizując zagadnienie georeferencji w kontekście najnowszego formatu IFC 4x3, należy zauważyć, że format ten umożliwia precyzyjne definiowanie dowolnego układu współrzędnych płaskich oraz wysokościowych. Jest to możliwe dzięki zastosowaniu kodów EPSG, które pozwalają na jednoznaczną identyfikację układów współrzędnych, lub poprzez zastosowanie opisu w formacie WKT, w przypadku stosowania niestandardowych układów. Ponadto w toku badań zauważono, że schemat został rozszerzony w porównaniu do wersji IFC 4 również o m.in. możliwość wykorzystania, poza stosowaniem projekcji i układów kartezjańskich, także układów geograficznych i ich definicję przez *IfcGeographicCRS*. Co więcej, schemat w obecnej wersji umożliwia także przeskalowanie przez współczynnik każdej z osi, co daje możliwość uwzględnienia zniekształceń wynikających z odwzorowania (*IfcMapConversionScaled*).

Opracowana w toku badań metodyka weryfikacji georeferencji, wykorzystująca specyfikację IDS (Information Delivery Specification) oraz oparta na sprawdzaniu atrybutów, a także procesy nadawania i transformacji georeferencji, może być oceniana jako wysoce efektywna. Dzięki temu podejściu możliwe jest elastyczne dostosowanie procesu georeferencji do specyficznych wymagań projektowych oraz normatywnych, a także weryfikacja możliwości wykorzystania plików IFC do celów integracji z cyfrowymi danymi geoprzestrzennymi.

- Reprezentacja geoprzestrzenna, po przekonwertowaniu w ramach schematu IFC z reprezentacji zagnieżdżonej do jawnej, a następnie transformacji do trójwymiarowych reprezentacji stosowanych w obszarze cyfrowych danych geoprzestrzennych, w szczególności w przypadku, kiedy pierwotna reprezentacja jest typu SweptSolid, może zawierać błędy topologiczne, co wynika z:
 - ograniczeń trójwymiarowych reprezentacji w przypadku cyfrowych danych geoprzestrzennych,
 - błędów na etapie modelowania obiektu,
 - błędów na etapie eksportu pliku IFC z oprogramowania komercyjnego, co wynika z błędnej implementacji schematów,
 - błędów numerycznych wynikających z zaokrągleń

- błędów wynikających z procesu przetwarzania reprezentacji z zagnieżdżonej na jawną.

Błędy te możliwe są do redukcji po zidentyfikowaniu głównych czynników wpływających. Jednakże, patrząc holistycznie, nie mają one znaczącego wpływu na realizowane przypadki użycia.

- Powstałe w toku prac algorytmy pozwalające na konwersje cyfrowych danych budowlanych mogą być traktowane jako uniwersalne, umożliwiające dalszą nadbudowę w celu implementacji konwersji do innych docelowych formatów takich jak CityGML (po dodaniu i zmapowaniu semantyki) czy 3DTiles dla celów wizualizacyjnych. Dzięki temu możliwe jest stworzenie niemal zamkniętego ekosystemu umożliwiającego na wielorakie wykorzystanie, w tym również wizualizacje.
- Podczas realizacji prac nie skupiano się na optymalizacji budowanych algorytmów pod względem czasowym. Część z nich możliwa jest do takowej optymalizacji, poprzez wykorzystanie innych języków programowania, silników geometrycznych (np. CGAL zamiast OpenCascade) czy zmianę budowy logiki samych wytworzonych algorytmów. Jednakże należy pamiętać, że powstałe rozwiązania to przede wszystkim prototypy, które demonstrują efekty działania dla różnych zidentyfikowanych scenariuszy i przypadków użycia.
- Na podstawie prac związanych z IFC, należy stwierdzić, że schemat ten jest skomplikowany i czasochłonne jest poznanie jego dogłębnej struktury oraz np. zmapowanie z innymi formatami danych. Co więcej, wraz z kolejnymi iteracjami (kolejnymi wersjami) struktura ta jest rozszerzana. Rozpatrując aspekt przestrzenny i strukturę przestrzenną plików IFC należy mieć na uwadze ilość układów współrzędnych, które są we wzajemnej relacji.
- Analiza kwestii transformacji GOI w ramach procesu budowlanego to aspekt wielowątkowy. Patrząc z punktu widzenia technologicznego potwierdzono możliwość przeprowadzania i wsparcia różnych działań inżyniera geodety na bazie standardów otwartych (w szczególności IFC). Z drugiej strony przekształcanie zasobów czy danych geodezyjnych do formatu IFC jest utrudnione co jest efektem przyjętej strategii w budowaniu oraz modelowaniu informacji w ramach poszczególnych zasobów. Z technologicznego punktu widzenia nie ma właściwie barier związanych z konwersją np. danych GESUT w postaci GML do IFC w sposób automatyczny. Problemem są jednak aspekty związane z pojemnością informacyjną stosowanych standardów co ogranicza bezpośrednio wykorzystanie w procesach realizowanych w metodyce BIM. W toku prac przeanalizowano transformację zakresu działań inżyniera geodety w całym cyklu życia obiektu w związku ze stosowaniem technologii BIM i digitalizacją budowlanego procesu inwestycyjnego. Nowe rozwiązania czy zaimplementowane w toku prac cyfrowe narzędzia wspierające umożliwiają automatyzację prac związaną przede wszystkim z zarządzaniem informacją i przygotowaniem danych. Rozpatrując natomiast metody akwizycji danych oraz generowanych na ich podstawie produktów, można stwierdzić, że dostarczają one wartościowych informacji wspierających proces podejmowania decyzji w budowlanym procesie inwestycyjnym. Niemniej jednak, ze względu na istniejące wytyczne, jak na przykład w przypadku Mapy do Celów Projektowych (MDCP), nadal wymagane jest stosowanie

bardziej tradycyjnych, dwuwymiarowych metod mapowania przestrzeni, co ogranicza pełne wykorzystanie potencjału technik akwizycji danych pozyskujących gęstą trójwymiarową informację o przestrzeni.

- Według autora, w celu budowy systemowych rozwiązań integrujących cyfrowe dane geoprzestrzenne oraz budowlane wymagane zmiany powinny być wprowadzane w sposób ewolucyjny. Należałoby przyjąć strategię wdrażania takich systemów wraz z „mapą drogową” w celu współbieżnego rozwoju organizacji wymagających (np. spółki zarządzające infrastrukturą) jak i spółek komercyjnych (np. przedsiębiorstwa geodezyjne).
- W ramach analizy rozbudowy formatu IFC oraz najnowszej jego wersji – IFC 4x3, widoczny jest rozwój w kierunku możliwości modelowania informacji geodezyjnych czy też geoprzestrzennych, co może mieć niebagatelne znaczenie dla celów budowy zintegrowanych rozwiązań czy dwukierunkowego przekazywania informacji (np. kataster 3D). Rozpoczynając od kwestii związanych z georeferencją np. możliwość zapisu układu z wykorzystaniem WKT, przez zapis informacji o dokładności (niepewności) czy tolerancji po kwestie związane z możliwością modelowania informacji np. o danych identyfikacyjnych działek.
- Opracowane w toku prac narzędzia dają możliwość elastycznego podejścia do przetwarzania (łączenia/konwersji) cyfrowych danych geoprzestrzennych oraz budowlanych, co jest widoczne, między innymi przez pryzmat ilości zaproponowanych przykładów zastosowania. Co więcej, wytworzone algorytmy pozwalają na bardziej efektywne zarządzanie danymi czy dostęp do nich np. w postaci bazy danych PostGIS, spełniając założenia demokratyzacji danych. Ponadto mogą być podstawą systemów umożliwiających realizację idei jednego źródła informacji. Opracowane metody umożliwiają realizację integracji zarówno dla obiektów kubaturowych jak i infrastrukturalnych.
- Zaimplementowane cyfrowe narzędzia wspierające dają możliwość wsparcia działań oraz zadań wynikających z budowlanego procesu inwestycyjnego, a co jest tego efektem, dają pole do działań optymalizacyjnych.
- Modułowość rozwiązania daje możliwość budowy wielu przykładów zastosowania. Dokładając kolejne moduły, możliwa jest dalsza nadbudowa i realizacja kolejnych przykładów zastosowania w postaci cyfrowych narzędzi wspierających.
- Otwarte standardy, w szczególności umożliwiające wymianę informacji (schemat IFC), wraz z zaimplementowanymi cyfrowymi narzędziami wspierającymi umożliwiają elastyczne podejście do integracji cyfrowych danych geoprzestrzennych oraz budowlanych. Jednakże z uwagi na różnice w obu domenach, istnieją trudności z implementacją wszystkich standardów otwartych BIM wprost dla danych geoprzestrzennych.
- Analizując opracowane rozwiązania pod względem zarządczym, mogą one usprawniać procesy koordynacji prac czy zarządzania informacją. Ponadto rozpatrując nowoczesne metodyki zarządzania budowlanymi procesami inwestycyjnymi mogą wspomóc realizację procesów w ramach VDC i usprawniać prace podczas spotkań ICE. Jednakże obszar ten wymaga dalszych badań.

- Rozpatrując zaimplementowane w toku prac (w rozdziale V) przykłady zastosowania, poniżej w sposób tabelaryczny zabrano wnioski dla poszczególnych (Tab. 17).

Tabela 17 Zbiór wniosków wynikający ze szczegółowej analizy poszczególnych zaimplementowanych przykładów zastosowania

Przykład zastosowania	Wnioski
Nadanie, weryfikacja bądź poprawa georeferencji plików IFC	Ze względu na krytyczność georeferencji w celu integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych wymagane są procesy oraz narzędzia, które umożliwią jej weryfikację, nadanie, bądź transformację. W ramach opisanego przykładu zastosowania, zrealizowano to zadanie dla IFC w wersji 4 oraz 4x3, co umożliwi wszechstronne podejście do procesów wymagających georeferencji plików IFC.
Wykorzystanie danych otwartych do wsparcia podejmowania decyzji w początkowych fazach inwestycji oraz jako baza do prac koncepcyjnych	Potencjał wykorzystania otwartych danych przestrzennych wydaje się na ten moment nie w pełni zrealizowany. Opracowany przykład zastosowania może wspomóc realizację koncepcji ich powszechniejszego zastosowania. W ramach zaimplementowanego cyfrowego narzędzia wspierającego na bazie zakresu przestrzennego zdefiniowanego w pliku IFC istnieje możliwość w ciągu zaledwie kilku minut uzyskania zróżnicowanych danych otwartych (NMT, NMPT, chmury punktów, ortofotomapy, BDOT10k), co może umożliwić wsparcie procesów podejmowania decyzji w początkowych fazach inwestycji czy identyfikację ryzyka.
Wykrycie i przeprowadzenie analizy potencjalnych kolizji na podstawie cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych (kolizje zewnętrzne)	Przedstawione rozwiązanie pozwoliło na potwierdzenie możliwości przeprowadzania analizy kolizji cyfrowych danych geoprzestrzennych oraz budowlanych. Jako podstawę rozwiązania zaproponowano bazę danych PostGIS. Realizacja tego typu procesu jest użyteczna dla potrzeby przeprowadzania kolizji zewnętrznych np. w przypadku posiadania danych zarówno w postaci cyfrowych danych geoprzestrzennych jak i budowlanych. Alternatywę może stanowić konwersja danych geoprzestrzennych do formatu IFC i wykonanie

	analizy kolizji w oprogramowaniu do koordynacji prac w technologii BIM.
Wsparcie procesu wyceny projektu poprzez połączenie cyfrowych danych budowlanych z danymi geoprzestrzennymi	Odpowiednia wycena projektu oraz wariantowanie są ważnym elementem rozpatrując cały proces inwestycyjny. W ramach niniejszego narzędzia zaproponowano i zrealizowano koncepcję połączenia danych geoprzestrzennych oraz budowlanych poprzez analizę geoprzestrzenną umożliwiającą automatyczne obliczenie stopnia pokrycia działek oraz przecięcia planowanego obiektu infrastrukturalnego z budynkami, co dokładając uwarunkowania ekonomiczne może pozwolić na szybką i efektywną wycenę tego aspektu projektu.
Wsparcie działań projektowych oraz koncepcyjnych poprzez konwersję cyfrowych danych geoprzestrzennych do formatu IFC (cyfrowych danych budowlanych)	Aspekt technologiczny możliwości konwersji cyfrowych danych geoprzestrzennych do cyfrowych danych budowlanych został potwierdzony. Jednakże ograniczeniem jest pojemność informacyjna stosowanych obecnie formatów w ramach zasobów geodezyjnych. Przedstawiona analiza dla sieci kanalizacyjnych zdefiniowanych w ramach GESUT obrazuje ten problem, w szczególności dla urzędzeń, które, w przypadku obiektów o średnicy mniejszej niż 0.75m nie posiadają informacji o szczegółowych wymiarach, co utrudnia konwersję do trójwymiarowej reprezentacji na wyższych poziomach szczegółowości.
Automatyzacja pozyskiwania danych do tyczenia obiektu dla wsparcia zadań inżyniera geodety	Opracowanie rozwiązań umożliwiających automatyczne generowanie danych na podstawie danych w formacie IFC wymaga szerokiej oraz skomplikowanej analizy. Po pierwsze inne podejście jest wymagane dla obiektów kubaturowych, a inne dla obiektów infrastrukturalnych. Po drugie, wypracowane narzędzia muszą mieć możliwość ekstrakcji specyficznych informacji dotyczących np. geometrii. Jednakże, poprzez zaimplementowanie cyfrowego narzędzia wspierającego udało się potwierdzić założenie

	możliwości automatyzacji tych prac, zarówno dla obiektów kubaturowych jak i infrastrukturalnych.
Analiza postępu prac budowlanych poprzez połączenie cyfrowych danych budowlanych z cyfrowymi danymi geoprzestrzennymi	Analiza postępu prac jest obecnie wykonywana z wykorzystaniem sensorów takich jak kamery czy skanery laserowe. Jednakże są to technologie, które wymagają operatora dla celów przeprowadzania procesów akwizycji danych, co limituje ich wykorzystanie dla celów automatyzacji tego procesu. W ramach niniejszego przykładu zastosowania przeanalizowano możliwość wykorzystania satelitarnych danych teledetekcyjnych oraz ich połączenia z BIM dla celów automatycznego śledzenia postępu prac budowlanych. Wyniki tych analiz pozwalają na identyfikację kluczowych obszarów oraz potrzeb jakie muszą zostać wykonane w celu realizacji tej koncepcji.

ROZDZIAŁ VII. Podsumowanie

VII.1 Podsumowanie

W ramach niniejszej pracy opracowano, a także zaimplementowano algorytmy i cyfrowe narzędzia wspierające oraz opisano różne podejścia do integracji cyfrowych danych geoprzestrzennych oraz budowlanych dla celów wsparcia czynności w ramach budowlanego procesu inwestycyjnego, w tym, w szczególności, w ujęciu Geodezyjnej Obsługi Inwestycji. Zidentyfikowano również możliwe obszary wymagające zmian w celu powszechniejszej implementacji takowych rozwiązań.

Powstałe rozwiązania są wszechstronne, dzięki czemu mogą stanowić fundament pod kolejne zastosowania, w tym, w szczególności, rozwój przypadków zastosowania opisanych w sekcji IV.1.

Rozpatrując strukturę pracy, realizacja prac, w ramach których poszerzany był stan wiedzy (*ang. body of knowledge*) została przede wszystkim opisana w rozdziale IV i V.

Patrząc holistycznie na wykonane prace:

- Przeanalizowano procesy w budowlanym procesie inwestycyjnym, patrząc w szczególności na styk cyfrowych danych geoprzestrzennych oraz budowlanych w celu identyfikacji interakcji, korzyści czy interferencji wynikających przede wszystkim z transformacji cyfrowej zachodzącej w obu domenach, w szczególności rozpatrując Geodezyjną Obsługę Inwestycji.
- Wykonano szczegółową analizę zapisu georeferencji w ramach schematu IFC (w tym najnowszego IFC 4x3), co jest kluczowym aspektem patrząc z punktu możliwości integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych. Ponadto opracowano narzędzia umożliwiające: weryfikację georeferencji – poprzez wykorzystanie IDS lub analizę atrybutów; nadanie georeferencji – poprzez wskazanie parametrów georeferencji np. dla klas *IfcMapConversion* oraz *IfcProjectedCRS*, bądź definicję punktów odpowiadających; transformację pliku IFC. Opracowane algorytmy oraz opis georeferencji w ramach struktury IFC mogą zostać wykorzystane następnie do stworzenia wytycznych czy też rozwiązań automatyzujących weryfikację plików.
- Przeprowadzono analizy metody zapisu danych w strukturze IFC w obszarze przede wszystkim reprezentacji geometrycznej, a następnie opracowano i zaimplementowano algorytmy pozwalające na konwersję z reprezentacji zagnieżdżonej do jawnej w postaci różnych typów reprezentacji (trójkąty, bądź płaszczyzny wielowierzchołkowe). Ponadto przeanalizowano aspekty reprezentacji jawnej dla obiektów infrastrukturalnych w ramach najnowszej wersji schematu IFC – IFC 4x3 oraz zaimplementowano algorytmy umożliwiające odczyt informacji o osi oraz jawnej reprezentacji geometrycznej obiektu infrastrukturalnego
- Zbadano możliwości oraz bariery konwersji cyfrowych danych geoprzestrzennych na cyfrowe dane budowlane (IFC), w szczególności analizując obszar zasobów geodezyjnych dotyczących Sieci Uzbrojenia Terenu. W tym celu opracowano i zaimplementowano algorytmy umożliwiające na konwersję cyfrowych danych geoprzestrzennych do formatu IFC.

- Opracowano algorytmy konwersji danych w postaci plików IFC do różnych formatów danych związanych z domeną geoprzestrzenną oraz w odwrotnym kierunku. Ponadto zaprezentowano metodę łączenia danych na podstawie bazy danych PostGIS.
- Zidentyfikowano przykłady zastosowania łączenia cyfrowych danych geoprzestrzennych oraz budowlanych, a także zaimplementowano cyfrowe narzędzia wspierające umożliwiające ich realizację w obszarze Geodezyjnej Obsługi Inwestycji.

Wykonane prace mogą stanowić również element działań związanych z tworzeniem wytycznych w zakresie rozwiązań dotyczących integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych.

Odwołując się do tezy zdefiniowanej na początku pracy:

„Opracowanie algorytmów i implementacja cyfrowych narzędzi wspierających, bazujących na standardach otwartych, do realizacji procesów integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych, umożliwi wsparcie budowlanych procesów inwestycyjnych realizowanych w technologii BIM.”. Po pierwsze opracowano algorytmy oraz zaimplementowano cyfrowe narzędzia wspierające integrację cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych na bazie standardów otwartych. Po drugie przedstawiono możliwości wsparcia zadań i procesów wynikających z interakcji pomiędzy domenami budowlaną oraz geoprzestrzenną poprzez wskazanie oraz szczegółową implementację zdefiniowanych przykładów zastosowania. Przeanalizowano również obszary zwiększenia efektywności poprzez zastosowanie zdefiniowanych oraz zaimplementowanych przykładów zastosowania na bazie opracowanych algorytmów. Można zatem stwierdzić, że teza zdefiniowana na początku pracy została potwierdzona.

Kod opracowany w ramach niniejszej pracy może zostać udostępniony na prośbę czytelnika, z zastrzeżeniem ograniczeń dotyczących komponentów stworzonych w ramach projektu ERJU (Europe's Rail Joint Undertaking).

VII.2 Plany na przyszłość

Rozpatrując plany na przyszłość, podzielono je na kilka obszarów: standaryzacyjno-prawny, społeczny oraz naukowy.

Pierwszy z wymienionych, standaryzacyjno-prawny, dotyczy, po pierwsze, wypracowania dobrych praktyk oraz metodyk integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych i opisanie ich w standardach czy też wytycznych. Można tutaj analizować podejście globalne, np. standardy międzynarodowe ISO, ale również lokalne wytyczne, usprawniające procesy budowlane. Co prawda istnieją raporty techniczne czy specyfikacje ISO dotyczące integracji czy interoperacyjności BIM i GIS (ISO/TR 23262:2021 GIS (geospatial) / BIM interoperability, 2021; ISO/TS 19166:2021 Geographic information — BIM to GIS conceptual mapping (B2GM), 2021), jednakże wciąż brak jest ujednoczonych aktów standaryzujących kwestię definicji i taksonomii oraz stosowanych metodyk. Również na polu lokalnym, np. dla terenu Polski, możliwe jest stworzenie lokalnych wytycznych dotyczących procesów integracji cyfrowych danych budowlanych i geoprzestrzennych, w tym definicji elementów GeoEIR czy możliwych do zastosowania przypadków użycia np. w oparciu o lokalne zasoby geodezyjne.

Po drugie, konieczna jest nowelizacja aktów regulujących dotychczasowe prace, aby umożliwić stosowanie nowoczesnych narzędzi, zarówno pomiarowych, jak i usprawniających różnorodne procesy np. zarządzania informacją.

Drugim obszarem działań, który powinien być przeanalizowany są aspekty społeczne. W ramach tego zakresu niezbędne jest prowadzenie prac nad poszerzeniem świadomości dotyczącej integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych przede wszystkim wśród decydentów. Należy zwrócić uwagę na korzyści wynikające z tego procesu, a także na wymagania dotyczące geometrii, modelowania obiektów oraz informacji niezbędnych do realizacji konkretnych scenariuszy zastosowania. Ponadto wymagane są działania mające na celu podnoszenie kompetencji poszczególnych interesariuszy budowlanego procesu inwestycyjnego w obszarze stosowania nowych rozwiązań cyfrowych.

Ostatni obszar, a zarazem według autora najważniejszy, dotyczy naukowego zakresu możliwych kierunków rozwoju. Z holistycznego punktu widzenia, kluczowe jest podjęcie badań skoncentrowanych na praktycznej realizacji proponowanych scenariuszy użycia opisanych w sekcji IV.1, szczególnie w kontekście wykorzystania standardów otwartych. Każdy z omawianych tam przykładów zastosowania stwarza możliwości znacznego usprawnienia procesów inwestycyjnych w budownictwie, co w rezultacie przekłada się na korzyści czasowe, budżetowe, jakościowe czy środowiskowe.

Rozpatrując jednak bardziej szczegółowo możliwe do podjęcia obszary prac należałoby wyróżnić:

- Praca nad rozwojem algorytmów do przetwarzania (np. konwersji) i analizy geometrii w postaci jawnej uzyskanej na podstawie reprezentacji zagnieżdżonej. Jak przedstawiono w niniejszej pracy, możliwa jest konwersja z zagnieżdżonej do jawnej reprezentacji geometrycznej, jednakże w niektórych przypadkach, powstają błędy topologiczne, które wynikają często ze zbyt szczegółowego lub błędnego zamodelowania obiektów. W ramach dalszych prac, należałoby się skupić nad rozwiązaniem tego typu błędów oraz zapewnieniem w pełni bezstratnej konwersji. Również kwestia optymalizacji czasowej jest możliwa do zbadania. Wypracowane w toku prac algorytmy nie są zoptymalizowane pod tym kątem. Jednym z proponowanych rozwiązań jest praca nad zdefiniowaniem MVD dostosowanego do wymagań procesów integracji, przede wszystkim w aspekcie reprezentacji geometrycznej.
- Weryfikacja powstałych algorytmów w realnych projektach w celu obliczenia metryk usprawnienia czy też optymalizacji poszczególnych procesów. W niniejszej pracy do potwierdzenia działania wypracowanych algorytmów stosowano przede wszystkim modele testowe, udostępniane przez różne organizacje na licencji otwartej. Kolejne badania mogą dotyczyć realnej weryfikacji usprawnień poprzez zastosowanie zaproponowanych algorytmów oraz wskazanie metryk podniesienia efektywności wspartych procesów.
- Kolejnym przyszłościowym obszarem badań jest wykorzystanie teledetekcji satelitarnej do usprawnienia prac w budowlanym procesie inwestycyjnym. Problematyka ta została opisana w sekcji V.2.7, jednakże, według autora, obszar ten ma znaczny potencjał nie tylko do monitorowania postępów prac budowlanych, ale również

wsparcia różnych procesów w całym cyklu życia obiektu. Szczególnie patrząc przez pryzmat zwiększającej się ilości operatorów dostarczających bardzo wysoko rozdzielcze zobrazowania satelitarne, obszar ten w przyszłości może przynieść duże korzyści. Wymaga on jednak wypracowania metod przetwarzania (np. Głębokie Uczenie Maszynowe) oraz łączenia z informacjami zawartymi w ramach cyfrowych danych budowlanych.

- Cyfrowe dane budowlane są często zdecydowanie bardziej szczegółowe aniżeli geoprzestrzenne. Jest to efekt potrzeby informacyjnej, ale również barier technologicznych. Dlatego też kolejnym obszarem przyszłych prac możliwych do realizacji są badania dotyczące generalizacji dostosowanej do potrzeb zdefiniowanych procesów łączenia cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych.
- Na podstawie przeprowadzonych badań, w szczególności analizy literatury, autor zidentyfikował większą ilość zrealizowanych badań realizujących integrację cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych poprzez konwersję danych z branży budowlanej na dane geoprzestrzenne. W związku z tym istnieje potrzeba podjęcia badań dotyczących konwersji w odwrotnym kierunku. Na przykład, zasoby geodezyjne są obecnie gromadzone z wykorzystaniem metod cyfrowych i powinny, przy zapewnieniu odpowiedniej jakości danych i pojemności informacyjnej, stanowić bezpośredni podkład (mapę bazową) dla modelowania podstawowej informacji w technologii BIM. Podobna problematyka dotyczy MDCP, której metody wytwarzania powinny ulec ewolucji. Niemniej jednak, zagadnienie to wymaga również wprowadzenia zmian legislacyjnych, w tym m.in. w metodach prowadzenia zasobów oraz wytwarzania MDCP.
- Kolejnym obszarem rozwoju jest budowa i wytwarzanie Cyfrowych Bliźniaków, w których cyfrowe dane budowlane, takie jak model powykonawczy, oraz dane geoprzestrzenne pełnią rolę kluczowego wsadu. Wykorzystane do tego celu mogą być różne rozwiązania bazodanowe jak tradycyjne obiektowo-relacyjne bazy danych czy też grafowe. Uzupełniając te informacje poprzez kontekst geoprzestrzenny możliwe jest usprawnienie przeprowadzania analiz oraz wsparcie procesów podejmowania decyzji, co znacząco zwiększa efektywność zarządzania projektami budowlanymi. W ramach dalszych badań należałoby jednak przedstawić metodykę integracji tych obszarów, w szczególności w obszarze stosowanych interfejsów np. zasilania cyfrowych bliźniaków poprzez dane pomiarowe.
- W niniejszej pracy omawiano przede wszystkim łączenie cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych w kontekście budowlanego procesu inwestycyjnego. Są jednak również inne obszary takie jak budowanie rozwiązań katastru 3D czy CIM (City Information Model), do których opracowane w niniejszej pracy algorytmy oraz narzędzia również mogą być użyteczne.
- Nie zidentyfikowano obecnie otwartego oprogramowania GIS, które daje możliwość analizy i wyświetlania cyfrowych danych budowlanych w postaci plików IFC. Natomiast rozwiązania komercyjne takie jak ArcGIS Pro, mogą być nieopłacalne ekonomicznie oraz, ze względu na zamknięty typ dystrybucji, zdecydowanie mniej

elastyczne. Stąd kolejny obszar badań dotyczy możliwości wytworzenia rozszerzenia do oprogramowania np. QGIS, do czego również mogą być użyteczne wypracowane w niniejszej pracy algorytmy.

- Z drugiej strony, istnieje możliwość rozbudowy oprogramowania Blender w celu efektywnego wykorzystania danych geoprzestrzennych. Choć dostępne jest rozszerzenie BlenderGIS, jego rozwój nie jest wystarczający, aby umożliwić przeprowadzanie zaawansowanych analiz geoprzestrzennych czy realizację przykładów zastosowania opisanych w sekcji IV.1. Opracowanie odpowiedniego rozszerzenia dla oprogramowania Blender w jednolitym ekosystemie mogłoby umożliwić integrację z innymi rozszerzeniami, takimi jak Bonsai (wcześniej znane jako BlenderBIM), co z kolei pozwoliłoby na realizację różnorodnych działań analitycznych w obszarze interakcji pomiędzy cyfrowymi danymi budowlanymi oraz geoprzestrzennymi.
- Kolejny obszar badań możliwych do realizacji to weryfikacja możliwości wykorzystania formatu LandXML jako łącznika pomiędzy cyfrowymi danymi geoprzestrzennymi a budowlanymi, w szczególności dla projektów infrastrukturalnych.
- Ponadto, należy śledzić dalszy rozwój formatu IFC, w tym wytwarzany obecnie format IFC w wersji 5, ponieważ może on rozszerzać możliwe do zamodelowania informacje z zakresu geoprzestrzennego.

Bibliografia

1. Akob, Z., Abang Hipni, M. Z., & Abd Razak, A. A. A. (2019). Deployment of GIS + BIM in the construction of Pan Borneo Highway Sarawak, Malaysia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 512(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/512/1/012037>
2. AlSaggaf, A., & Jrade, A. (2023). ArcSPAT: an integrated building information modeling (BIM) and geographic information system (GIS) model for site layout planning. *International Journal of Construction Management*, 23(3), 505–527. <https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1894071>
3. Amirebrahimi, S., Rajabifard, A., Mendis, P., & Ngo, T. (2015). A data model for integrating GIS and BIM for assessment and 3D visualisation of flood damage to building. *CEUR Workshop Proceedings*, 1323, 78–89.
4. Amirebrahimi, S., Rajabifard, A., Mendis, P., & Ngo, T. (2016). A framework for a microscale flood damage assessment and visualization for a building using BIM–GIS integration. *International Journal of Digital Earth*, 9(4), 363–386. <https://doi.org/10.1080/17538947.2015.1034201>
5. Asgari Siahboomy, M., Sarvari, H., Chan, D. W. M., Nassereddine, H., & Chen, Z. (2021). A multi-criteria optimization study for locating industrial warehouses with the integration of BIM and GIS data. *Architectural Engineering and Design Management*, 17(5–6), 478–495. <https://doi.org/10.1080/17452007.2021.1881880>
6. Atazadeh, B., Halalkhor Mirkalaei, L., Olfat, H., Rajabifard, A., & Shojaei, D. (2021). Integration of cadastral survey data into building information models. *Geo-spatial Information Science*, 24(3), 387–402. <https://doi.org/10.1080/10095020.2021.1937336>
7. Atkinson, R. A., Hunter, A., Car, N. J., Purss, M. B. J., & Cochrane, B. (2022). Roadmap for Interoperable 3D Data Models in Ogc Apis and Other Data Exchange Approaches. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 48(4/W4-2022), 13–20. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W4-2022-13-2022>
8. Benachio, G. L. F., Freitas, M. do C. D., & Tavares, S. F. (2020). Circular economy in the construction industry: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 260, 121046. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121046>
9. Bhatla, A., Choe, S. Y., Fierro, O., & Leite, F. (2012). Evaluation of accuracy of as-built 3D modeling from photos taken by handheld digital cameras. *Automation in Construction*, 28(2012), 116–127. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.06.003>
10. Biljecki, F., Kumar, K., & Nagel, C. (2018). CityGML Application Domain Extension (ADE): overview of developments. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 3(1), 1–17. <https://doi.org/10.1186/s40965-018-0055-6>
11. Blut, C., Becker, R., Kinnen, T., Schluetter, D., Emunds, C., Frisch, J., Heidermann, D., Wenthe, M., Rettig, T., Baranski, M., van Treeck, C., & Blankenbach, J. (2024). Optimizing Building Energy Systems through BIM-enabled georeferenced Digital Twins. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-4/W(July), 1–8. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W11-2024-1-2024>
12. Boguslawski, P., Mahdjoubi, L., Zverovich, V., Fadli, F., & Barki, H. (2015). BIM-GIS modelling in support of emergency response applications. *Building Information Modelling (BIM) in Design, Construction and Operations*, 1(July 2016), 381–391. <https://doi.org/10.2495/bim150321>
13. Borkowski, A. S., & To Duc, A. (2024). Integration of BIM and GIS Data of a Heritage Building Using FME. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 34(2), 204–215. <https://doi.org/10.59440/ceer/190231>
14. Borrmann, A. (2010). From GIS to BIM and back again - A Spatial Query Language for 3D building models and 3D city models. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 38(4 PART W15), 19–26.
15. Bosché, F., Ahmed, M., Turkan, Y., Haas, C. T., & Haas, R. (2015). The value of integrating Scan-to-BIM and Scan-vs-BIM techniques for construction monitoring using laser scanning and BIM: The case of cylindrical MEP components. *Automation in Construction*, 49, 201–213. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.05.014>
16. BS EN 17412-1:2020 Building information modelling - level of information need. Concepts and principles (2020).
17. buildingSMART. (2024a). *IfcElement* - Schemat IFC 4x3. https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4_3/HTML/lexical/IfcElement.htm
18. buildingSMART. (2024b). *IfcFacetedBrep* - schemat IFC 4x3. https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4_3/HTML/lexical/IfcFacetedBrep.htm
19. buildingSMART. (2024c). *Otwarte standardy BIM opracowywane przez buildingSMART*.

- <https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/>
20. buildingSMART. (2024d). *Przykład pliku reprezentującego obiekt infrastrukturalny (droga) w IFC 4x3*. <https://github.com/buildingSMART/IFC4.x-IF/tree/pjanck-patch-TE01/IFC-files/IFCRoad-ItalyWG>
 21. buildingSMART. (2024e). *Przykład pliku reprezentującego obiekt infrastrukturalny (wiadukt) w IFC 4x3*. <https://github.com/buildingSMART/IFC4.x-IF/tree/main/IFC-files/ACCA/Bridge-for-MINnD>
 22. buildingSMART. (2024f). *Przykład reprezentacji CSG dla IFC 4x3*. https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4_3/HTML/annex_e/advanced-geometric-shape/bath-csg-solid.html
 23. buildingSMART. (2024g). *Schemat Information Delivery Specification w wersji 1.0*. <https://standards.buildingsmart.org/IDS/1.0/>
 24. BuildingSMART. (2024). *IfcWall - Schemat IFC 4x3*. https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4_3/HTML/lexical/IfcWall.htm
 25. buildingSMART Australia. (2020). *User Guide for Geo-referencing in IFC*. <https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/standards-library/>
 26. *Cechy informacji – Encyklopedia Zarządzania*. (2024). https://mfiles.pl/pl/index.php/Cechy_informacji
 27. Cepa, J. J., Pavón, R. M., Alberti, M. G., & Caramés, P. (2023). Towards BIM-GIS integration for road intelligent management system. *Journal of Civil Engineering and Management*, 29(7), 621–638. <https://doi.org/10.3846/jcem.2023.19514>
 28. Chen, Y., Shooraj, E., Rajabifard, A., & Sabri, S. (2018). From IFC to 3D tiles: An integrated open-source solution for visualising BIMs on cesium. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(10). <https://doi.org/10.3390/ijgi7100393>
 29. Chognard, S., Dubois, A., Benmansour, Y., Torri, E., & Domer, B. (2018). Digital Construction Permit: A Round Trip Between GIS and IFC. W I. Smith & B. Domer (Red.), *Advanced Computing Strategies for Engineering. EG-ICE 2018. Lecture Notes in Computer Science: T. 10864 LNCS* (ss. 287–306). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91638-5_16
 30. Christian, C., & Hendrik, G. (2019). Level of Georeferencing (LoGeoRef) using IFC for BIM. *Journal of Geodesy, Cartography and Cadastre*, 10, 15–20.
 31. CIOB. (2022). *Code of Practice for Project Management for the Built Environment* (6th wyd.). Wiley Blackwell.
 32. Clemen, C. (2022). Trends in Bim and Gis Standardization – Report From the Joint Iso/Tc59/Sc13–Iso/Tc211 Wg: Gis-Bim. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVI-5/W1-, 51–58. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xxlvi-5-w1-2022-51-2022>
 33. Clemen, C., Schröder, M., Kaiser, T., & Romanschek, E. (2021). IfcTerrain - a Free and Open Source Tool to Convert Digital Terrain Models (DTM) to Openbim Industry Foundation Classes (IFC). *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 8(4/W2-2021), 145–151. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-VIII-4-W2-2021-145-2021>
 34. Corlu, E., & Isikdag, U. (2024). 3D Visibility Analyses Using BIM & GIS Integration. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-4/W(4/W9-2024), 107–114. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W9-2024-107-2024>
 35. *Dane udostępniane przez Geoportal.gov.pl*. (2024). <https://www.geoportal.gov.pl/pl/dane/>
 36. De Winter, H., Bassier, M., De Geyter, S., & Vergauwen, M. (2022). Automatic Calculation of Volume Changes in Road Construction. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 48(2/W2-2022), 23–30. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W2-2022-23-2022>
 37. Deng, Y., Cheng, J. C. P., & Anumba, C. (2016). A framework for 3D traffic noise mapping using data from BIM and GIS integration. *Structure and Infrastructure Engineering*, 12(10), 1267–1280. <https://doi.org/10.1080/15732479.2015.1110603>
 38. Deng, Y., Gan, V. J. L., Das, M., Cheng, J. C. P., & Anumba, C. (2019). Integrating 4D BIM and GIS for Construction Supply Chain Management. *Journal of Construction Engineering and Management*, 145(4), 1–15. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001633](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001633)
 39. Diakite, A. A., & Zlatanova, S. (2020). Automatic geo-referencing of BIM in GIS environments using building footprints. *Computers, Environment and Urban Systems*, 80(July 2019), 101453. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2019.101453>
 40. Domer, B., & Bernardello, R. (2023). *Interoperability: an introduction to IFC and buildingSmart standards integrating infrastructure modeling*. EPFL Press.
 41. Durdyev, S., & Hosseini, M. R. (2020). Causes of delays on construction projects: a comprehensive list. *International Journal of Managing Projects in Business*, 13(1), 20–46. <https://doi.org/10.1108/IJMPB-09-2018-0178>
 42. Eichler, C. C., Schranz, C., Krischmann, T., & Urban, H. (2023). *BIMcert Handbook Basic Knowledge*

- openBIM* (2024. wyd.). buildingSMART Austria. <https://doi.org/10.34726/5383>
43. Evans, A., Rourke, G., Barbrook, I., Heaphy, I., Tomkins, A., Suchocki, M., Kumar, S. S., & Haigh, M. (2023). Transforming the Civil Engineering Surveyor. *Sustainable and Digital Building*, 17–40. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25795-7_2
 44. Fischer, M., Ashcraft, H., Reed, D., & Khanzode, A. (2017). *Integrated Project Delivery*. John Wiley & Sons, Inc.
 45. Fischer, M., & Kunz, J. (2004). *The scope and role of Information Technology in construction*.
 46. François, A., Raffin, R., & Daniel, M. (2010). Geometric data structures and analysis in GIS: ISO 19107 case study. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 38(4 PART W15), 115–120.
 47. Gabryś, M., & Ortyl, L. (2020). Georeferencing of Multi-Channel GPR—Accuracy and Efficiency of Mapping of Underground Utility Networks. *Remote Sensing 2020, Vol. 12, Page 2945*, 12(18), 2945. <https://doi.org/10.3390/RS12182945>
 48. Garramone, M., Tonelli, E., & Scaioni, M. (2022). a Multi-Scale Bim/Gis Framework for Railways Asset Management. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVI-5/W1-*, 95–102. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlvi-5-w1-2022-95-2022>
 49. GDDKiA. (2024). *GDDKiA. Inwestycja drogowa to projekt na lata*. <https://www.archiwum.gddkia.gov.pl/pl/a/41133/Inwestycja-drogowa-to-projekt-na-lata>
 50. Geospatial Media. (2023). *GEOBIM Market in AEC Industry*.
 51. Ghaffarianhoseini, A., Tookey, J., Ghaffarianhoseini, A., Naismith, N., Azhar, S., Efimova, O., & Raahemifar, K. (2017). Building Information Modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1046–1053. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.083>
 52. Gilbert, T., Gruler, H.-C., Kolbe, T. H., Mercer, A., Nisbet, N., Plume, J., Rönsdorf, C., Simmons, S., & van Berlo, L. (2020). *Built environment data standards and their integration: an analysis of IFC, CityGML and LandInfra*. <https://www.buildingsmart.org/buildingsmart-international-bis-and-open-geospatial-consortium-ogc-release-bim-and-gis-integration-paper/>
 53. Gillins, D. T., Dennis, M. L., & Ng, A. Y. (Red.). (2022). *Surveying and Geomatics Engineering*. American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784416037>
 54. Glinka, S. (2022). Cross-sectional SWOT Analysis of BIM and GIS Integration. *Geomatics and Environmental Engineering*, 16(3), 157–184. <https://doi.org/https://doi.org/10.7494/geom.2022.16.3.157>
 55. Glinka, S. (2023). Georeferencja plików IFC Cz. 1 – Walidacja. *Przegląd Geodezyjny*, 1(5), 29–31. <https://doi.org/10.15199/50.2023.05.5>
 56. Glinka, S. (2024). *Sat4BIM4D - the concept of using satellite remote sensing to monitor construction progress in conjunction with BIM (w recenzji)*.
 57. Glinka, S., & Owerko, T. (2021). Otwarte dane przestrzenne jako bazowe źródło informacji w systemach integrujących dane BIM oraz GIS. *Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie. Seria: Materiały Konferencyjne*.
 58. Glinka, S., Owerko, T., & Tomaszewicz, K. (2022a). Information Exchange Using the Open IFC Format from a Surveyor’s Perspective. *FIG Congress 2022, September 2022*.
 59. Glinka, S., Owerko, T., & Tomaszewicz, K. (2022b). Using Open Vector-Based Spatial Data to Create Semantic Datasets for Building Segmentation for Raster Data. *Remote Sensing*, 14(12), 2745. <https://doi.org/10.3390/rs14122745>
 60. Glinka, S., Owerko, T., Tomaszewicz, K., & Kuras, P. (2024). *Development and Implementation of Data-Level Integration Through Bim2gis Conversion Algorithms with Creation of Annotated Synthetic Point Clouds Support*. <https://doi.org/10.2139/SSRN.4935094>
 61. *Główny Urząd Geodezji i Kartografii - WalidatorPlikowGML: Walidacja i kontrola danych GML baz EGiB, BDOT500, GESUT, PRNG, BDOT10k, BDOO*. (b.d.). Pobrano 1 wrzesień 2024, z <https://github.com/GlownyUrzadGeodezjiIKartografii/WalidatorPlikowGML/tree/main>
 62. Gotlib, D., Iwaniak, A., & Olszewski, R. (2007). *GIS. Obszary zastosowań*. Wydawnictwo Naukowe PWN.
 63. Gotlib, D., & Karabin, M. (2017). Integration of Models of Building Interiors with Cadastral Data. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, 104(1), 91–102. <https://doi.org/10.1515/rgg-2017-0018>
 64. Hajji, R., Yaagoubi, R., Meliana, I., Laafou, I., & Gholabzouri, A. El. (2021). Development of an Integrated BIM-3D GIS Approach for 3D Cadastre in Morocco. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(5), 1–20. <https://doi.org/10.3390/ijgi10050351>
 65. Hakim, A., Arroyo Ohori, K., van der Vaart, J., El Yamani, S., & Stoter, J. (2024). Enhancing Georeferencing of IFC Models through Surveyed Points Integration. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVIII-4/W(July)*, 41–47.

- <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W11-2024-41-2024>
66. Halim, E., Mohamed, A., & Fathi, M. S. (2022). Building Information Modelling (BIM) Implementation for Highway Project from Consultant's Perspectives in Malaysia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 971(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/971/1/012003>
 67. He, T., Chen, K., Jazizadeh, F., & Reichard, G. (2024). Unmanned aerial vehicle-based as-built surveys of buildings. *Automation in Construction*, 161(May), 105323. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105323>
 68. Hijazi, I., Ehlers, M., & Zlatanova, S. (2010). Bim for geo-analysis (BIM4GEOA): Set up of 3D information system with open source software and open specification (OS). *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 38(4 PART W15), 45–49.
 69. Hobbs, J., Blythe, J., Chalupsky, H., & Russ, T. (2006). *A Survey of Geospatial Resources, Representation and Reasoning*.
 70. Hobeika, N., Van Liempt, J., Noardo, F., Arroyo Ochori, K., & Stoter, J. (2022). Geobim Information To Check Digital Building Permit Regulations. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 43(B4-2022), 529–535. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-B4-2022-529-2022>
 71. *IFCINFRA - przykładowe modele*. (2024). <https://ifcinfra.de/ifc-bridge/bridge-abschluss/>
 72. Ifcopenshell. (2024a). *Repozytorium github biblioteki ifcopenshell*. <https://github.com/IfcOpenShell/IfcOpenShell>
 73. Ifcopenshell. (2024b). *Rozszerzenie biblioteki ifcopenshell - ifctester*. <https://github.com/IfcOpenShell/IfcOpenShell/tree/v0.8.0/src/ifctester>
 74. Irizarry, J., & Karan, E. P. (2012). Optimizing location of tower cranes on construction sites through GIS and BIM integration. *Electronic Journal of Information Technology in Construction*, 17, 351–366.
 75. Irizarry, J., Karan, E. P., & Jalaei, F. (2013). Integrating BIM and GIS to improve the visual monitoring of construction supply chain management. *Automation in Construction*, 31, 241–254. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.12.005>
 76. Isikdag, U., Zlatanova, S., & Underwood, J. (2013). A BIM-Oriented Model for supporting indoor navigation requirements. *Computers, Environment and Urban Systems*, 41, 112–123. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2013.05.001>
 77. Ismaeil, E. M. H. (2024). Asset Information Model Management-Based GIS/BIM Integration in Facility Management Contract. *Sustainability (Switzerland)*, 16(6). <https://doi.org/10.3390/su16062495>
 78. ISO/TR 23262:2021 GIS (geospatial) / BIM interoperability (2021).
 79. ISO/TS 19166:2021 Geographic information — BIM to GIS conceptual mapping (B2GM) (2021).
 80. ISO 11354-1:2011 - Advanced automation technologies and their applications — Requirements for establishing manufacturing enterprise process interoperability — Part 1: Framework for enterprise interoperability (2011).
 81. ISO 16739-1:2024 - Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries — Part 1: Data schema (2024).
 82. ISO 19107:2019 - Geographic information — Spatial schema (2019).
 83. ISO 19111:2019 - Geographic information — Referencing by coordinates (2019).
 84. ISO 19650-1:2018 - Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and principle (2018).
 85. ISO 19650-2:2018 - Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 2: Delivery phase of the (2018).
 86. ISO 7817-1:2024 Building information modelling — Level of information need Part 1: Concepts and principles (2024).
 87. Jaud, Clemen, C., Muhič, S., & Borrmann, A. (2022). Georeferencing in IFC: Meeting the Requirements of Infrastructure and Building Industries. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 10(4/W2-2022), 145–152. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W2-2022-145-2022>
 88. Jaud, Š., & Clemen, C. (2024). GeoMVD: the Journey to High-Quality Georeferencing Profiles in IFC Datasets. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, X-4/W5-202(July), 203–210. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W5-2024-203-2024>
 89. Jaud, Š., Donaubaue, A., & Borrmann, A. (2019). Georeferencing within IFC: A Novel Approach for Infrastructure Objects. *Computing in Civil Engineering 2019*, 377–384. <https://doi.org/10.1061/9780784482421.048>
 90. Jaud, Š., Donaubaue, A., Heunecke, O., & Borrmann, A. (2020). Georeferencing in the context of

- building information modelling. *Automation in Construction*, 118, 103211. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103211>
91. Jetlund, K., Onstein, E., & Huang, L. (2020). IFC schemas in ISO/TC 211 compliant UML for improved interoperability between BIM and GIS. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(4), 278. <https://doi.org/10.3390/ijgi9040278>
 92. Jiménez-Jiménez, S. I., Ojeda-Bustamante, W., Marcial-Pablo, M. D. J., & Enciso, J. (2021). Digital terrain models generated with low-cost UAV photogrammetry: Methodology and accuracy. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/ijgi10050285>
 93. Kamari, M., & Ham, Y. (2021). Vision-based volumetric measurements via deep learning-based point cloud segmentation for material management in jobsites. *Automation in Construction*, 121(April 2020), 103430. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103430>
 94. Karan, E. P., Irizarry, J., & Haymaker, J. (2016). BIM and GIS Integration and Interoperability Based on Semantic Web Technology. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 30(3), 1–11. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cp.1943-5487.0000519](https://doi.org/10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000519)
 95. Kasznia, D., Magiera, J., & Wierzowiecki, P. (2017). *BIM w praktyce*. Wydawnictwo Naukowe PWN.
 96. Khallaf, R., & Khallaf, M. (2021). Classification and analysis of deep learning applications in construction: A systematic literature review. *Automation in Construction*, 129, 103760. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2021.103760>
 97. Khan, M. S., Park, J., & Seo, J. (2021). Geotechnical property modeling and construction safety zoning based on gis and bim integration. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/app11094004>
 98. Khanna, M., Elghaish, F., McIlwaine, S., & Brooks, T. (2021). Feasibility of implementing IPD approach for infrastructure projects in developing countries. *Journal of Information Technology in Construction*, 26(September), 902–921. <https://doi.org/10.36680/J.ITCON.2021.048>
 99. Kirillov, A., Mintun, E., Ravi, N., Mao, H., Rolland, C., Gustafson, L., Xiao, T., Whitehead, S., Berg, A. C., Lo, W. Y., Dollár, P., & Girshick, R. (2023). Segment Anything. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 3992–4003. <https://doi.org/10.1109/ICCV51070.2023.00371>
 100. KIT. (2024). *KIT - przykłady IFC - IFC Wiki*. https://www.ifcwiki.org/index.php?title=KIT_IFC_Examples
 101. Kumar, K., Labetski, A., Otori, K. A., Ledoux, H., & Stoter, J. (2019). The LandInfra standard and its role in solving the BIM-GIS quagmire. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 4(1). <https://doi.org/10.1186/s40965-019-0065-z>
 102. Kunz, J., & Fischer, M. (2020). Virtual design and construction. *Construction Management and Economics*, 38(4), 355–363. <https://doi.org/10.1080/01446193.2020.1714068>
 103. Kurwi, S., Demian, P., Blay, K. B., & Hassan, T. M. (2021). Collaboration through Integrated BIM and GIS for the Design Process in Rail Projects: Formalising the Requirements. *Infrastructures*, 6(4), 1–19. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6040052>
 104. Ledoux, H. (2013). On the Validation of Solids Represented with the International Standards for Geographic Information. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 28(9), 693–706. <https://doi.org/10.1111/mice.12043>
 105. Leng, S., Lin, J.-R., Li, S.-W., & Hu, Z.-Z. (2021). A Data Integration and Simplification Framework for Improving Site Planning and Building Design. *IEEE Access*, 9, 148845–148861. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3124010>
 106. Liu, A. H., Ellul, C., & Swiderska, M. (2021). Decision making in the 4th dimension-exploring use cases and technical options for the integration of 4D BIM and GIS during construction. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/ijgi10040203>
 107. Liu, X., Wang, X., Wright, G., Cheng, J., Li, X., & Liu, R. (2017). A State-of-the-Art Review on the Integration of Building Information Modeling (BIM) and Geographic Information System (GIS). *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(2), 1–21. <https://doi.org/10.3390/ijgi6020053>
 108. Liu, Y., Lin, H., Zhao, Z., Bai, W., & Hu, N. (2023). Research on the Visualization of Railway Signal Operation and Maintenance Based on BIM + GIS. *Sensors*, 23(13). <https://doi.org/10.3390/s23135984>
 109. Lv, Z., Li, X., Lv, H., & Xiu, W. (2020). BIM Big Data Storage in WebVRGIS. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(4), 2566–2573. <https://doi.org/10.1109/TII.2019.2916689>
 110. Ma, L., Liu, Y., Zhang, X., Ye, Y., Yin, G., & Johnson, B. A. (2019). Deep learning in remote sensing applications: A meta-analysis and review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 152, 166–177. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.04.015>
 111. Malinverni, E. S., Naticchia, B., Lerma Garcia, J. L., Gorreja, A., Lopez Uriarte, J., & Di Stefano, F. (2022). A semantic graph database for the interoperability of 3D GIS data. *Applied Geomatics*, 14, 53–66. <https://doi.org/10.1007/s12518-020-00334-3>

112. Marzouk, M., & Othman, A. (2020). Planning utility infrastructure requirements for smart cities using the integration between BIM and GIS. *Sustainable Cities and Society*, 57(March), 102120. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102120>
113. Massimiliano, P., Domenica, C., Alfio, V. S., Restuccia, A. G., & Papalino, N. M. (2021). Scan to BIM for the digital management and representation in 3D GIS environment of cultural heritage site. *Journal of Cultural Heritage*. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2021.05.006>
114. McGlenn, K., Brennan, R., Debruyne, C., Meehan, A., McNeerney, L., Clinton, E., Kelly, P., & O'Sullivan, D. (2021). Publishing authoritative geospatial data to support interlinking of building information models. *Automation in Construction*, 124, 103534. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103534>
115. McKinsey & Company. (2020). *The next normal in construction*. [https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Capital Projects and Infrastructure/Our Insights/The next normal in construction.pdf](https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Capital%20Projects%20and%20Infrastructure/Our%20Insights/The%20next%20normal%20in%20construction.pdf)
116. McKinsey Global Institute. (2017). *Reinventing Construction: A Route To Higher Productivity*. <https://doi.org/10.30875/b49c5f82-en>
117. Michał, T., Bukłaha, E., Gruzca, B., Juchniewicz, M., Metelski, W., & Wyrozębski, P. (2012). Nowoczesne zarządzanie projektami. W *PWE, Warszawa*.
118. Mignard, C., & Nicolle, C. (2014). Merging BIM and GIS using ontologies application to Urban facility management in ACTIVE3D. *Computers in Industry*, 65(9), 1276–1290. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2014.07.008>
119. Milnes, C., Aellig, P., Gaullier, N., Schneider-Roos, K., Deborah, H., Wiener, D., & Guldimann, R. (2014). *Global Base Infrastructure Report - 4th GIB Summit*.
120. Mirarchi, C., Pavan, A., de Marco, F., Wang, X., & Song, Y. (2018). Supporting facility management processes through end-users' Integration and coordinated BIM-GIS technologies. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(5). <https://doi.org/10.3390/IJGI7050191>
121. Moon, D., Chung, S., Kwon, S., Seo, J., & Shin, J. (2019). Comparison and utilization of point cloud generated from photogrammetry and laser scanning: 3D world model for smart heavy equipment planning. *Automation in Construction*, 98, 322–331. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.07.020>
122. Naji, K. K., Gunduz, M., Alhenzab, F. H., Al-Hababi, H., & Al-Qahtani, A. H. (2024). A Systematic Review of the Digital Transformation of the Building Construction Industry. *IEEE Access*, 12(January), 31461–31487. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3365934>
123. Niestroj, M. G., McMeekin, D. A., & Helmholz, P. (2018). Overview of standards towards road asset information exchange. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(4), 523–527. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-443-2018>
124. Nikoohemat, S., Diakité, A. A., Zlatanova, S., & Vosselman, G. (2020). Indoor 3D reconstruction from point clouds for optimal routing in complex buildings to support disaster management. *Automation in Construction*, 113, 103109. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103109>
125. Niu, S., Yang, Y., & Pan, W. (2019). Logistics Planning and Visualization of Modular Integrated Construction Projects Based on BIM-GIS Integration and Vehicle Routing Algorithm. *Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings*, 579–586. <https://doi.org/10.29173/mocs141>
126. Noardo, F., Guler, D., Fauth, J., Malacarne, G., Mastrolembo Ventura, S., Azenha, M., Olsson, P.-O., & Senger, L. (2022). Unveiling the actual progress of Digital Building Permit: Getting awareness through a critical state of the art review. *Building and Environment*, 213(October), 108854. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108854>
127. Noardo, F., Harrie, L., Otori, K. A., Biljecki, F., Ellul, C., Krijnen, T., Eriksson, H., Guler, D., Hintz, D., Jadidi, M. A., Pla, M., Sanchez, S., Soini, V. P., Stouffs, R., Tekavec, J., & Stoter, J. (2020). Tools for BIM-GIS integration (IFC georeferencing and conversions): Results from the GeoBIM benchmark 2019. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(9). <https://doi.org/10.3390/ijgi9090502>
128. Noardo, F., Krijnen, T., Arroyo Otori, K., Biljecki, F., Ellul, C., Harrie, L., Eriksson, H., Polia, L., Salheb, N., Tauscher, H., van Liempt, J., Goerne, H., Hintz, D., Kaiser, T., Leoni, C., Warchol, A., & Stoter, J. (2021). Reference study of IFC software support: The GeoBIM benchmark 2019—Part I. *Transactions in GIS*, 25(2), 805–841. <https://doi.org/10.1111/tgis.12709>
129. Noardo, F., Otori, K. A., Krijnen, T., & Stoter, J. (2021). An inspection of ifc models from practice. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(5), 1–28. <https://doi.org/10.3390/app11052232>
130. Nofal, O. M., van de Lind, J. W., & Zakzouk, A. (2022). BIM-GIS integration approach for high-fidelity wind hazard modeling at the community-level. *Frontiers in Built Environment*, 8(November), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.915209>
131. Nwaogu, J. M., Yang, Y., Chan, A. P. C., & Chi, H. lin. (2023). Application of drones in the architecture, engineering, and construction (AEC) industry. *Automation in Construction*, 150, 104827. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104827>

132. Otori, K. A., Ledoux, H., & Peters, R. (2024). *3D modelling of the built environment*. 143. <https://github.com/tudelft3d/3dbook/releases>
133. Ortyl, Ł., Gabryś, M. G., Dawood, T., Abouhamad, M., & Alsharqawi, M. (2021). Subsoil Recognition for Road Investment Supported by the Integration of Geodetic and GPR Data in the Form of a Point Cloud. *Remote Sensing 2021, Vol. 13, Page 3886*, 13(19), 3886. <https://doi.org/10.3390/RS13193886>
134. Owerko, P., & Owerko, T. (2021). Novel Approach to Inspections of As-Built Reinforcement in Incrementally Launched Bridges by Means of Computer Vision-Based Point Cloud Data. *IEEE Sensors Journal*, 21(10), 11822–11833. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3020132>
135. Owerko, T., Czerw, K., Glinka, S., Kasznia, D., Kuras, P., Łaguna, P., Paschalski, J., Rochel, M., Tomaszewicz, K., & Wrzosek, M. (2024). *AGH_FP4_R003 Opracowanie standardu modelowania danych i obiegu informacji budowlanej, w całym cyklu życia obiektu, zgodnie z ISO19650 (cz. 1 i 2) na potrzeby wytworzenia BIM Asset Information Model zgodne z kryteriami Digital Twin z wykorzystaniem otwart.*
136. *paireks/dotbim: Minimalist file format for BIM*. (2024). <https://github.com/paireks/dotbim>
137. Patel, T., Guo, B. H. W., & Zou, Y. (2021). A scientometric review of construction progress monitoring studies. *Engineering, Construction and Architectural Management*. <https://doi.org/10.1108/ECAM-10-2020-0799>
138. Peng, S., Su, G., Chen, J., & Du, P. (2017). Design of an IoT-BIM-GIS Based Risk Management System for Hospital Basic Operation. *Proceedings - 11th IEEE International Symposium on Service-Oriented System Engineering, SOSE 2017*, 69–74. <https://doi.org/10.1109/SOSE.2017.22>
139. Pepe, M., Costantino, D., Alfio, V. S., Restuccia, A. G., & Papalino, N. M. (2021). Scan to BIM for the digital management and representation in 3D GIS environment of cultural heritage site. *Journal of Cultural Heritage*, 50, 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2021.05.006>
140. Pittard, S., & Sell, P. (Ed.). (2017). *BIM and Quantity Surveying*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315677361>
141. Piwkowski, W., Styliński, J., Kasznia, D., Owerko, T., Bednarczyk, R., Grochowski, M., Chajęcki, M., Kindler, M., Magiera, J., Sokołowski, M., Wilkosz, K., & Zuber, M. (2020). *BIM Standard PL. Projekt Zasad Przygotowania i Realizacji Inwestycji Kubaturowych w Polsce Zgodny z Normą PN-EN ISO 19650 i Krajowym Prawem Budowlanym*. <https://www.gov.pl/attachment/9a5b41e7-dcc1-4d1c-aa9e-4174c008df82>
142. Project Management Institute. (2017). *A guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK guide) (6th ed.)*. Project Management Institute.
143. Rafiee, A., Dias, E., Frujtier, S., & Scholten, H. (2014). From BIM to Geo-analysis: View Coverage and Shadow Analysis by BIM/GIS Integration. *Procedia Environmental Sciences*, 22, 397–402. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2014.11.037>
144. Royal Institute of British Architects. (2020). RIBA Plan of Work Overview. *Riba*, 10–11.
145. Rozporządzenie Ministra Rozwoju, Pracy i Technologii z dnia 23 lipca 2021 r. w sprawie geodezyjnej ewidencji sieci uzbrojenia terenu (2021).
146. Ruzgienne, B., Berteška, T., Gečyte, S., Jakubauskiene, E., & Aksamitauskas, V. Č. (2015). The surface modelling based on UAV Photogrammetry and qualitative estimation. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 73, 619–627. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.04.018>
147. Sani, M. J., & Abdul Rahman, A. (2018). GIS and BIM integration at data level: A review. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-4/W9(4/W9)*, 299–306. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W9-299-2018>
148. Santos, P. A. S., Cortez, B., & Carvalho, M. T. M. (2024). Integrating GIS and BIM with MCDM for infrastructure planning: a comprehensive framework. *Engineering, Construction and Architectural Management*. <https://doi.org/10.1108/ECAM-08-2023-0830>
149. Schwaber, K., & Sutherland, J. (2020). *Przewodnik po Scrumie*.
150. Şenol, H. İ., & Gökğöz, T. (2024). Integration of Building Information modeling (BIM) and Geographic Information System (GIS): a new approach for IFC to CityJSON conversion. *Earth Science Informatics*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01343-1>
151. Sev, A. (2009). How can the construction industry contribute to sustainable development? A conceptual framework. *Sustainable Development*, 17(3), 161–173. <https://doi.org/10.1002/sd.373>
152. Sharafat, A., Khan, M. S., Latif, K., Tanoli, W. A., Park, W., & Seo, J. (2021). BIM-GIS-Based Integrated Framework for Underground Utility Management System for Earthwork Operations. *Applied Sciences*, 11(12), 5721. <https://doi.org/10.3390/app11125721>
153. Sheik, N. A., Veelaert, P., & Deruyter, G. (2023). Exchanging Progress Information Using IFC-Based BIM for Automated Progress Monitoring. *Buildings*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/buildings13092390>
154. Shi, J., Pan, Z., Jiang, L., & Zhai, X. (2023). An ontology-based methodology to establish city information

- model of digital twin city by merging BIM, GIS and IoT. *Advanced Engineering Informatics*, 57(May), 102114. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.102114>
155. Shkundalov, D., & Viltienė, T. (2021). Bibliometric analysis of building information modeling, geographic information systems and web environment integration. *Automation in Construction*, 128, 103757. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103757>
 156. Slongo, C., Malacarne, G., & Matt, D. T. (2022). The IFC File Format As A Means Of Integrating BIM And GIS: The Case Of The Management And Maintenance Of Underground Networks. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, V-4-2022(4), 301–309. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-4-2022-301-2022>
 157. Sofia, H., Anas, E., & Faiz, O. (2020). Mobile mapping, machine learning and digital twin for road infrastructure monitoring and maintenance: Case study of mohammed VI bridge in Morocco. *Proceedings - 2020 IEEE International Conference of Moroccan Geomatics, MORGEO 2020*, 8–13. <https://doi.org/10.1109/Morgeo49228.2020.9121882>
 158. Son, S., Park, H., & Lee, K. H. (2002). Automated laser scanning system for reverse engineering and inspection. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(8), 889–897. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00030-5](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00030-5)
 159. Song, S., Yang, J., & Kim, N. (2012). Development of a BIM-based structural framework optimization and simulation system for building construction. *Computers in Industry*, 63(9), 895–912. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2012.08.013>
 160. Su, X., Andoh, A. R., Cai, H., Pan, J., Kandil, A., & Said, H. M. (2012). GIS-based dynamic construction site material layout evaluation for building renovation projects. *Automation in Construction*, 27, 40–49. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.04.007>
 161. Sun, J., Mi, S., Olsson, P. O., Paulsson, J., & Harrie, L. (2019). Utilizing BIM and GIS for Representation and Visualization of 3D Cadastre. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(11), 1–21. <https://doi.org/10.3390/ijgi8110503>
 162. Sun, Q., Zhou, X., & Hou, D. (2020). A simplified citygml-based 3d indoor space model for indoor applications. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(20), 1–22. <https://doi.org/10.3390/app10207218>
 163. Survey4BIM. (2015). *SURVEY and the Digital Plan of Works*.
 164. Tan, Y., Liang, Y., & Zhu, J. (2023). CityGML in the Integration of BIM and the GIS: Challenges and Opportunities. *Buildings*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/buildings13071758>
 165. Tan, Y., Song, Y., Zhu, J., Long, Q., Wang, X., & Cheng, J. C. P. (2018). Optimizing lift operations and vessel transport schedules for disassembly of multiple offshore platforms using BIM and GIS. *Automation in Construction*, 94, 328–339. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.07.012>
 166. Tarihmen, B., Diyarbakirli, B., Kanbur, M. O., & Demirel, H. (2020). Indoor navigation system of faculty of civil engineering, ITU: A BIM approach. *Baltic Journal of Modern Computing*, 8(2), 359–369. <https://doi.org/10.22364/BJMC.2020.8.2.11>
 167. Tsilimantou, E., Delegou, E. T., Nikitakos, I. A., Ioannidis, C., & Moropoulou, A. (2020). GIS and BIM as integrated digital environments for modeling and monitoring of historic buildings. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/app10031078>
 168. Tuttas, S., Braun, A., Borrmann, A., & Stilla, U. (2017). Acquisition and Consecutive Registration of Photogrammetric Point Clouds for Construction Progress Monitoring Using a 4D BIM. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, 85(1), 3–15. <https://doi.org/10.1007/s41064-016-0002-z>
 169. Tzortzopoulos, P., Kagioglou, M., & Koskela, L. (2020). *Lean Construction Core Concepts and New Frontiers* (1st wyd.). Routledge.
 170. Uggla, G., & Horemuz, M. (2018). Georeferencing Methods for IFC. *Proceedings - 2018 Baltic Geodetic Congress, BGC-Geomatics 2018*, 207–211. <https://doi.org/10.1109/BGC-GEOMATICS.2018.00045>
 171. USIBD. (2016). *USIBD Level of Accuracy (LOA) Specification Guide. Document C120 - Version 2.0-2016*.
 172. Vacca, G., Quaquero, E., Pili, D., & Brandolini, M. (2018). Integrating bim and gis data to support the management of large building stocks. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(4), 717–724. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-647-2018>
 173. Wang, H., Pan, Y., & Luo, X. (2019). Integration of BIM and GIS in sustainable built environment: A review and bibliometric analysis. *Automation in Construction*, 103, 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.005>
 174. Wang, M., Deng, Y., Won, J., & Cheng, J. C. P. (2019). An integrated underground utility management and decision support based on BIM and GIS. *Automation in Construction*, 107, 102931. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102931>
 175. Wody Polskie. (2024). *Mapy zagrożenia powodziowego*. https://www.powodz.gov.pl/pl/o_mapach

176. Wu, C., Yuan, Y., Tang, Y., & Tian, B. (2021). Application of Terrestrial Laser Scanning (TLS) in the Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry. *Sensors*, 22(1), 265. <https://doi.org/10.3390/s22010265>
177. Wu, Q., & Osco, L. P. (2023). samgeo: A Python package for segmenting geospatial data with the Segment Anything Model (SAM). *Journal of Open Source Software*, 8(89), 5663. <https://doi.org/10.21105/joss.05663>
178. Wyszomirski, M. (2022). Analysis of the possibility of using key-value store NoSQL databases for IFC data processing in the BIM-GIS integration process. *Polish Cartographical Review*, 54(1), 11–22. <https://doi.org/10.2478/pcr-2022-0002>
179. Wyszomirski, M., & Gotlib, D. (2020). A unified database solution to process bim and gis data. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(23), 1–19. <https://doi.org/10.3390/app10238518>
180. Xu, Z., Zhang, L., Li, H., Lin, Y. H., & Yin, S. (2020). Combining IFC and 3D tiles to create 3D visualization for building information modeling. *Automation in Construction*, 109, 102995. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102995>
181. Yang, Q., Yan, X., Chen, W., & Fan, J. (2024). Construction and Application of Safety Management Scenarios at Construction Sites. *Applied Sciences*, 14(1), 404. <https://doi.org/10.3390/app14010404>
182. Yang, Y., Ng, S. T., Dao, J., Zhou, S., Xu, F. J., Xu, X., & Zhou, Z. (2021). BIM-GIS-DCEs enabled vulnerability assessment of interdependent infrastructures – A case of stormwater drainage-building-road transport Nexus in urban flooding. *Automation in Construction*, 125, 103626. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103626>
183. Zhang, C., Liu, Y., Lin, C., Zhou, L., Lin, B., & Che, M. (2019). Development of a CityGML application domain extension for simulating the building construction process. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(12), 576. <https://doi.org/10.3390/ijgi8120576>
184. Zhang, S., Hou, D., Wang, C., Pan, F., & Yan, L. (2020). Integrating and managing BIM in 3D web-based GIS for hydraulic and hydropower engineering projects. *Automation in Construction*, 112, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103114>
185. Zhao, L., Liu, Z., & Mbachu, J. (2019). Highway alignment optimization: An integrated BIM and GIS approach. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(4). <https://doi.org/10.3390/ijgi8040172>
186. Zhong, H. B., & Hao, P. W. (2014). Visible Project Management System for Highway Construction Based on 3D Virtual Reality and Information Technology. *Advanced Materials Research*, 1030–1032(6), 2170–2177. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1030-1032.2170>
187. Zhu, J., Chong, H. Y., Zhao, H., Wu, J., Tan, Y., & Xu, H. (2022). The Application of Graph in BIM/GIS Integration. *Buildings*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/buildings12122162>
188. Zhu, J., Wang, J., Wang, X., & Tan, Y. (2019). An Economical Approach to Geo-Referencing 3D Model for Integration of BIM and GIS. W *Innovative Production and Construction* (Numer December, ss. 321–334). WORLD SCIENTIFIC. https://doi.org/10.1142/9789813272491_0019
189. Zhu, J., Wang, X., Chen, M., Wu, P., & Kim, M. J. (2019). Integration of BIM and GIS: IFC geometry transformation to shapefile using enhanced open-source approach. *Automation in Construction*, 106, 102859. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102859>
190. Zhu, J., Wang, X., Wang, P., Wu, Z., & Kim, M. J. (2019). Integration of BIM and GIS: Geometry from IFC to shapefile using open-source technology. *Automation in Construction*, 102, 105–119. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.02.014>
191. Zhu, J., Wright, G., Wang, J., & Wang, X. (2018). A critical review of the integration of geographic information system and building information modelling at the data level. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(2), 1–16. <https://doi.org/10.3390/ijgi7020066>
192. Zhu, J., & Wu, P. (2021a). A Common Approach to Geo-Referencing Building Models in Industry Foundation Classes for BIM/GIS Integration. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/ijgi10060362>
193. Zhu, J., & Wu, P. (2021b). Towards effective bim/gis data integration for smart city by integrating computer graphics technique. *Remote Sensing*, 13(10), 1889. <https://doi.org/10.3390/rs13101889>
194. Zhu, J., & Wu, P. (2022). BIM/GIS data integration from the perspective of information flow. *Automation in Construction*, 136, 104166. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104166>
195. Zhu, J., Wu, P., Chen, M., Kim, M. J., Wang, X., & Fang, T. (2020). Automatically processing IFC clipping representation for BIM and GIS integration at the process level. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/app10062009>

Spis tabel

Tabela 1 Charakterystyka etapów cyklu życia obiektu	26
Tabela 2 Zidentyfikowane otwarte dane geoprzestrzenne dostępne dla terenu Polski, mogące być użyteczne w budowlanym procesie inwestycyjnym.	45
Tabela 3 Nowe bądź zmodyfikowane zadania oraz możliwe narzędzia/zasoby wspomagające inżyniera geodetę w ramach cyfryzacji procesów budowlanych i prowadzenia prac z wykorzystaniem BIM i standardów otwartych	48
Tabela 4 Charakterystyka oraz różnice pomiędzy cyfrowymi danymi budowlanymi oraz geoprzestrzennymi....	56
Tabela 5 Obszary zastosowań integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych	65
Tabela 6 Analiza SWOT integracji cyfrowych danych budowlanych i geoprzestrzennych (opracowanie własne na podstawie (Glinka, 2022)).....	68
Tabela 7 Tabelaryczne przedstawienie poziomów georeferencji wraz z uwzględnieniem aktualizacji w najnowszej wersji IFC 4x3. Opracowanie własne na podstawie (Glinka i in., 2024).....	91
Tabela 8 Algorytm konwersji do jawnej reprezentacji z wykorzystaniem trójkątów na bazie biblioteki ifcopenshell.....	99
Tabela 9 Algorytm konwersji do jawnej reprezentacji z większą liczbą wierzchołków na bazie biblioteki ifcopenshell oraz OpenCascade.	100
Tabela 10 Możliwe typy zapisu krzywych/przechyłek zaimplementowane w IFC 4X3.....	102
Tabela 11 Analiza segmentów osi oraz uzyskanych długości dla parametrów	104
Tabela 12 Analizowana reprezentacja geoprzestrzenna dla celów konwersji do formatu IFC	114
Tabela 13 Przykładowy raport weryfikacji georeferencji dla pliku IFC	116
Tabela 14 Uzyskane rezultaty detekcji kolizji na podstawie bazy danych PostGIS.....	125
Tabela 15 Rezultaty przeprowadzonych analiz dla działek będących w obrębie korytarza	128
Tabela 16 Zidentyfikowany budynek będący w obszarze zdefiniowanego korytarza.....	129
Tabela 17 Zbiór wniosków wynikający ze szczegółowej analizy poszczególnych zaimplementowanych przykładów zastosowania.....	151

Spis rysunków

Rysunek 1 Triada projektowa jako podstawowa zależność w zarządzaniu projektami oraz procesach inwestycyjnych (Project Management Institute, 2017).....	20
Rysunek 2 GDDKiA - realizacja inwestycji w zależności od metody prowadzenia inwestycji (<i>GDDKiA. Inwestycja drogowa to projekt na lata</i>).....	22
Rysunek 3 Etapy cyklu życia obiektu.....	23
Rysunek 4 Zmiana na temat wiedzy o obiekcie/nieruchomości w czasie (po lewej) (Kaszniak i in., 2017) oraz krzywa MacLeamy'ego zestawiająca ze sobą koszt zmian w projekcie, zdolność kontrolowania kosztów oraz zaangażowanie (po prawej) (Halim i in., 2022).....	24
Rysunek 5 Przykładowe mapy procesu etapu koncepcji oraz projektowania (projekt budowlany) (T. Owerko i in., 2024).....	25
Rysunek 6 Przykładowe mapy procesu projektowania (projekt wykonawczy) oraz etapu budowy (T. Owerko i in., 2024).....	25
Rysunek 7 Ogólna struktura zarządcza wynikająca ze standardów dla celów zarządzania informacją projektową oraz o zasobach (ISO 19650-1:2018 - Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and principles, 2018).....	29
Rysunek 8 Struktura interesariuszy w ramach standardów ISO 19650.....	30
Rysunek 9 Wytwarzanie wymagań informacyjnych oraz modeli informacyjnych w ramach ISO 19650.....	31
Rysunek 10 Proces zarządzania informacją w ramach ISO 19650-1 oraz CDE (ISO 19650-1:2018 - Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and principles, 2018).....	33
Rysunek 11 Etapy realizacji projektu według ISO 19650-2 (opracowano na podstawie (ISO 19650-2:2018 - Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 2: Delivery phase of the, 2018)).....	34
Rysunek 12 Schemat zależności pomiędzy otwartymi standardami BIM w procesach zarządzania informacją.....	35
Rysunek 13 Schemat dziedziczenia w IFC dla klasy IfcElement (buildingSMART, 2024a).....	37
Rysunek 14 Schemat relacji w ramach klasy IfcWall w strukturze IFC wraz z przykładem zapisu w pliku IFC.....	38
Rysunek 15 Zarządzanie informacją i wymaganiami informacyjnymi z wykorzystaniem otwartych standardów BIM (Eichler i in., 2023).....	42
Rysunek 16 Interoperacyjność domeny geoprzestrzennej (GIS) oraz budowlanej (BIM) wraz z stosowanymi standardami oraz ogólną ideą wymiany informacji.....	53
Rysunek 17 Model poziomów dojrzałości GeoBIM (łączenia cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych) (Geospatial Media, 2023).....	55
Rysunek 18 Przepływ informacji pomiędzy domenami geoprzestrzenną oraz budowlaną na poziomie technologicznym (opracowanie własne na podstawie (Zhu & Wu, 2022)).....	57
Rysunek 19 Konwersja BUD → GEO do formatów bazujących na geometrii danych.....	58
Rysunek 20 Zidentyfikowane przykłady zastosowania i ich umiejscowienie w ramach etapów cyklu życia obiektu.....	71
Rysunek 21 Opracowany uogólniony schemat procesu integracji cyfrowych danych budowlanych oraz geoprzestrzennych.....	82
Rysunek 22 Schemat odczytu danych z IFC oraz zapisu do różnych metod reprezentacji (Glinka i in., 2024).....	84
Rysunek 23 Opracowany schemat konwersji cyfrowych danych geoprzestrzennych do formatu IFC.....	85
Rysunek 24 Schemat dla klasy IfcLocalPlacement jako klasy umożliwiającej zdefiniowanie układu współrzędnych.....	89
Rysunek 25 Georeferencja IFC – schematyczne przedstawienie klas, w których mogą być zawarte informacje o georeferencji w formacie IFC (Glinka i in., 2024).....	91
Rysunek 26 Domyślna (główna) relacja przestrzenna pomiędzy układami współrzędnych w formacie IFC (Glinka i in., 2024).....	95
Rysunek 27 Schemat klasy IfcElement w odniesieniu do możliwości reprezentacji (Glinka i in., 2024).....	96
Rysunek 28 Metody zapisu geometrii trójwymiarowej (Zhu i in., 2020).....	96
Rysunek 29 Przykład zapisu CSG w pliku IFC (buildingSMART, 2024f).....	97
Rysunek 30 IfcFacetedBrep - przykład obrazujący metodę reprezentacji. Po lewej schematyczna prezentacja (buildingSMART, 2024b), po prawej reprezentacja zapisana w pliku IFC.....	97
Rysunek 31 Przykład reprezentacji IfcTesselatedItem w ramach struktury IFC.....	98

Rysunek 32 Przykład reprezentacji IfcSectionedSolidHorizontal w ramach struktury IFC.....	98
Rysunek 33 Zaimplementowane metody reprezentacji jawnej (Glinka i in., 2024).....	99
Rysunek 34 Schemat zapisu informacji o infrastrukturze w ramach schematu IFC	102
Rysunek 35 Plik testowy dla celów weryfikacji algorytmów związanych z analizą IfcAlignment. U góry, widok modelu z ‘lotu ptaka’, na dole zbliżenie na model (buildingSMART, 2024d).	103
Rysunek 36 Wizualizacja jawnej reprezentacji osi w formacie wektorowym. Numery przy każdym segmencie odpowiadają id segmentu w Tab. 11.....	104
Rysunek 37 Rodzaje reprezentacji geometrycznych w domenie geoprzestrzennej na bazie ISO 19107. Po lewej lista dostępnych reprezentacji (Hobbs i in., 2006), po prawej przykłady wizualizacji (Ohori i in., 2024)	106
Rysunek 38 Przykładowy podział GM_Curve i przykładowe możliwe do zastosowania typy krzywych w ramach ISO 19107 (François i in., 2010)v.....	106
Rysunek 39 Schemat mapowania geometrii pomiędzy danymi w domenie geoprzestrzennej a IFC.....	107
Rysunek 40 Zestawy właściwości w schemacie IFC - przykład możliwych domyślnych zestawów właściwości dla klasy IfcWall (po lewej) (BuildingSMART, 2024) oraz zapis w pliku IFC (po prawej).	109
Rysunek 41 Struktura klas w schemacie IFC umożliwiająca zapis informacji o harmonogramie oraz kosztach (Sheik i in., 2023).....	109
Rysunek 42 Model testowy na potrzeby przedstawienia algorytmów łączenia danych ((IFCINFRA - przykładowe modele, 2024).....	111
Rysunek 43 Wizualizacja konwersji do formatu ESRI Shapefile. U góry plik IFC, u dołu ten sam plik przekonwertowany do reprezentacji wektorowej multipatch.....	111
Rysunek 44 Wizualizacji konwersji do chmury punktów wraz z reprezentacją wektorową.....	112
Rysunek 45 Tabela z przekonwertowanym modelem do postaci PostGIS.....	113
Rysunek 46 Wizualizacja wczytanego modelu z bazy danych PostGIS (wizualizacja z wykorzystaniem FME).....	113
Rysunek 47 Elementy z błędną geometrią uzyskane po konwersji do PostGIS na podstawie narzędzia <i>GeometryValidator</i> w oprogramowaniu <i>FME</i>	114
Rysunek 48 Rezultat konwersji reprezentacji opisanej w Tab. 12 do IFC. Po lewej stronie stworzony plik IFC, po prawej u góry widok z góry na reprezentację z Tab. 12, po prawej u dołu wyeksportowany model.....	114
Rysunek 49 Weryfikacja georeferencji poprzez analizę atrybutów w pliku IFC	116
Rysunek 50 Weryfikacja georeferencji plików IFC z wykorzystaniem standardu IDS	117
Rysunek 51 Wizualizacja stworzonego IDS na potrzeby weryfikacji georeferencji. Po lewej weryfikacja LoGeoRef50 w zapisie XML, po prawej tabelaryczne zestawienie wymagań w wytworzonej specyfikacji.	118
Rysunek 52 Walidacja z wykorzystaniem narzędzia <i>ifctester</i> opracowanej specyfikacji IDS dla przykładowego pliku IFC.	118
Rysunek 53 Schemat procesu nadania lub korekcji georeferencji pliku IFC	119
Rysunek 54 Lewy górny róg model testowy; prawy górny róg odczytana georeferencja dla modelu wejściowego; parametry georeferencji do przypisania (lewy dolny róg), prawy dolny róg odczytana georeferencja i poziom po nadaniu georeferencji.	120
Rysunek 55 Wizualizacja procesu transformacji pliku IFC	120
Rysunek 56 Schemat pozyskania danych otwartych.....	122
Rysunek 57 Odczyt reprezentacji dla klasy IfcSite	122
Rysunek 58 Model na podkładzie pobranych danych otwartych dla działki i modelu oraz okolicy. Po lewej stronie u góry - chmura punktów LiDAR oraz ortofotomapa, po prawej u góry NMPT, po lewej u dołu NMT, po prawej u dołu BDOT10k (poszczególne warstwy wektorowe).	123
Rysunek 59 Schemat przedstawiający algorytm do przeprowadzania analiz kolizji zewnętrznych.....	124
Rysunek 60 Dane wejściowe dla algorytmu: model mostu (w odcieniach szarości) oraz dwie nitki przewodów (na pomarańczowo).....	125
Rysunek 61 Rezultaty przecięcia jakie powinny zostać uzyskane dla obu obiektów liniowych. Przy elementach z pliku IFC przypisano GlobalID w celach weryfikacyjnych.	125
Rysunek 62 Przykład zastosowania wsparcia wyceny projektu poprzez połączenie cyfrowych danych budowlanych z danymi geoprzestrzennymi	126
Rysunek 63 Plik testowy (Viadotto Acerno) wykorzystany w ramach niniejszego przykładu zastosowania (buildingSMART, 2024e)	127
Rysunek 64 Wizualizacja osi obiektów infrastrukturalnych zamodelowanych w pliku testowym na podkładzie Ewidencji Gruntów i Budynków.....	128
Rysunek 65 Wizualizacja działek oraz budynku w obrębie zdefiniowanego korytarza.....	128

Rysunek 66 Schemat zapisu informacji w ramach GESUT GML z wykorzystaniem UML - część dotycząca przewodów oraz urządzeń sieci kanalizacyjnej (Rozporządzenie Ministra Rozwoju, Pracy i Technologii z dnia 23 lipca 2021 r. W sprawie geodezyjnej ewidencji sieci uzbrojenia terenu, 2021).....	130
Rysunek 67 Przykładowe rezultaty konwersji danych geoprzestrzennych GESUT – przewody oraz urządzenia sieci kanalizacyjnej do IFC. U góry przewody kanalizacyjne wraz z przypisanym <i>gml_id</i> , u dołu urządzenia oraz przewody kanalizacyjne – na fioletowo <i>gml_id</i> dla urządzeń; na zielono <i>gml_id</i> dla przewodów.....	132
Rysunek 68 Schemat automatycznego generowania danych do tyczenia dla obiektów kubaturowych	134
Rysunek 69 Plik testowy dla celów automatycznego wygenerowania danych do tyczenia (KIT, 2024)	134
Rysunek 70 Model testowy w kontekście geoprzestrzennym.....	135
Rysunek 71 Osie modelu testowego oraz przecięcia osi dla klasy IfcWall na wysokości 0.1m.....	135
Rysunek 72 Nałożenie modelu oraz uzyskanych osi i punktów przecięć (punktów do tyczenia)	136
Rysunek 73 Schemat automatycznego generowania danych do tyczenia dla obiektów infrastrukturalnych.....	137
Rysunek 74 Przykładowo wyglądający przebieg osi infrastruktury oraz punkty uzyskane z przekrojów.....	138
Rysunek 75 Schemat przykładowego przekroju poprzecznego wraz z odniesieniem do identyfikatora <i>GlobalId</i> poszczególnych warstw	138
Rysunek 76 Koncepcja systemu umożliwiającego monitorowanie postępu prac budowlanych na podstawie zdjęć satelitarnych (Glinka, 2024)	141
Rysunek 77 Zmiany wizualne obrazujące postęp prac budowlanych na podstawie zobrazowań Sentinel-2 dla budowy fragmentu drogi ekspresowej S7 Naprawa – Skomielna Biała w okolicach północnego wlotu do tunelu (okres 2016-2022).....	142
Rysunek 78 Segmentacja zobrazowania z wykorzystaniem narzędzia <i>segment-geospatial</i>	143
Rysunek 79 Zmiany wizualne na podstawie ortofotomapy dla budowy fragmentu drogi ekspresowej S7 Naprawa – Skomielna Biała w okolicach północnego wlotu do tunelu (okres 2016-2022).....	144
Rysunek 80 Porównanie zobrazowań Sentinel-2 (rozdzielczość 10 metrów) – po lewej oraz ortofotomapy (rozdzielczość 0.25m) – po środku dla tego samego obszaru oraz podobnego czasu akwizycji. Segmentacja obiektów/obszarów z wykorzystaniem <i>segment-geospatial</i> po prawej.	145