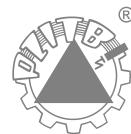


PRZEGŁĄD budowlany



97 lat

CZASOPISMO POLSKIEGO ZWIĄZKU INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW BUDOWNICTWA

NR 3/2026



210
LAT TRADYCJI
SGGW

80
LAT KSZTAŁCENIA
NA WYDZIALE BUDOWNICTWA
I INŻYNIERII ŚRODOWISKA



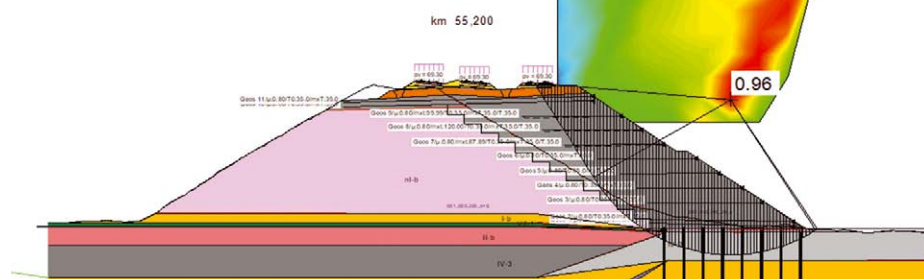
XL OGÓLNOPOLSKIE WARSZTATY
PRACY PROJEKTANTA KONSTRUKCJI
JUBILEUSZOWE



geotechnika
projektowanie
materiały
laboratorium
skany 3D

Soil	ϕ_a [°]	c_a [kN/m ²]	γ_a [kN/m ³]	Designation
33.10	0.00	17.90	17.90	at-b
36.30	0.00	16.20	16.20	I-b
3.00	6.00	13.80	13.80	VIII-1
32.89	0.00	17.10	17.10	III-b
12.50	12.50	20.50	20.50	IV-2
20.70	25.10	21.90	21.90	IV-3
36.00	0.00	17.90	17.90	II-b
37.80	0.00	18.60	18.60	I-c
39.90	0.00	17.00	17.00	III-c
34.00	0.00	17.00	17.00	II-c
33.00	0.00	19.00	19.00	warstwa ochronna
33.00	0.00	19.00	19.00	materialnaśpywy
40.00	40.00	25.00	25.00	kolumny

DIN 4084 (new)
 $m_{rel} = 0.96$
 $X_{rel} = 86.38$ m
 $Y_{rel} = 167.79$ m
 $R = 16.23$ m
 Partial factors:
 $\gamma(p) = 1.25$
 $\gamma(c) = 1.25$
 $\gamma(\phi) = 1.40$
 $\gamma(P \text{ (permanent actions)}) = 1.00$
 $\gamma(P \text{ (variable actions)}) = 1.30$
 $\gamma(P \text{ (pull-out)}) = 1.4000$



STATECZNOŚĆ • OSIADANIA • ODWODNIENIA • MONITORING GEOTECHNICZNY
POSADOWIENIE KONSTRUKCJI • MURY OPOROWE • GEOSYNTETYKI

BUDOWLANA
FIRMA
ROKU 2025

KREATOR
BUDOWNICTWA
ROKU 2023

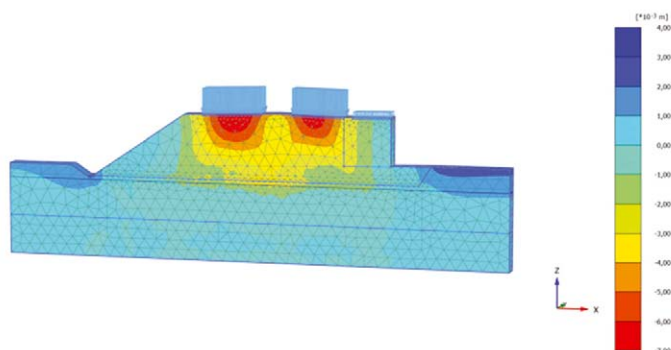
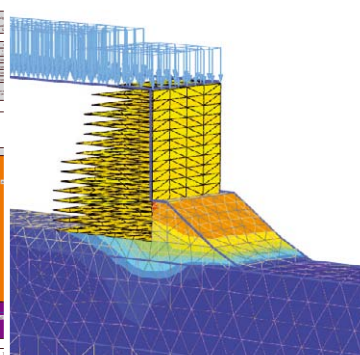
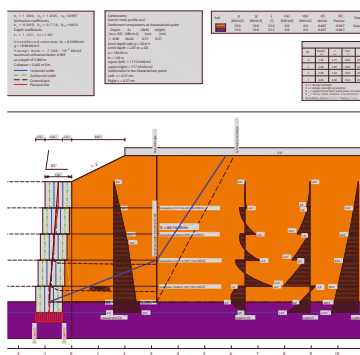
solidna firma		2025	2024
2023	2022	2021	2020
2019	2018	2017	2016
2015	2014	2013	2012
2011	2010	2009	2008
2007	2006	2005	2004

Konsultacje
Doradztwo
techniczne
Projektowanie

Analizy
Nadzór
autorski
Dostawy

Nasze główne działania obejmują prace inżynierskie w dziedzinie geotechniki:

- kompleksowe projekty branży geotechnicznej
- analizy stateczności i konsolidacji podłoża
- doboru i weryfikacji technologii
- optymalizacji, obliczeń, projektów branżowych
- monitoringu konstrukcji w fazie budowy i użytkowania
- przygotowania specyfikacji, przedmiarów robót



Przedsiębiorstwo Realizacyjne *INORA* sp. z o.o.
 44-101 Gliwice 1; ul. Prymasa Stefana Wyszyńskiego 11
 tel.: 32 238 86 23 fax: 32 230 49 97 e-mail: inora@inora.pl
 Dział techniczny: tech@inora.pl Dział handlowy: oferty@inora.pl

więcej informacji na:

www.inora.pl



OGÓLNOPOLSKIE WARSZTATY PRACY PROJEKTANTA KONSTRUKCJI



PRZEGLĄD budowlany

Maj-Czerwiec 2026

„Przegląd Budowlany” – czasopismo naukowo-techniczne od roku 1929 promujące polski przemysł budowlany, właścicielem jest Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa, którego celem jest transfer wiedzy z zakresu inżynierii lądowej do praktyki budowlanej w zakresie planowania inwestycji, wykonawstwa, projektowania i utrzymania obiektów budowlanych z zastosowaniem nowoczesnych materiałów i technologii informatycznych.

Czasopismo publikuje:

- oryginalne artykuły prezentujące rozwiązania problemów naukowo-technicznych ze wszystkich specjalności inżynierii lądowej i architektury,
- informacje o nowych normach i kierunkach ich zmian,
- informacje promujące nowoczesne materiały i technologie, w tym technologie informatyczne (np. BIM),
- prezentacje nowych inwestycji i zastosowań nowoczesnych technologii,
- informacje na temat działalności Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa, w szczególności Zarządu Głównego PZITB i poszczególnych oddziałów, w tym informacje o planowanych i odbytych wydarzeniach,
- materiały dotyczące konferencji naukowo-technicznych,
- prezentacje prac dyplomowych oraz innych prac technicznych podejmowanych przez studentów kierunku Budownictwo.

Główne obszary tematyczne to:

- nowe technologie i materiały dla budownictwa, szczególnie rozwiązania ekologiczne,
- ocena stanu technicznego, wzmacnianie i renowacje obiektów budowlanych,
- badania służące rozwiązywaniu problemów technicznych inżynierii lądowej,
- narzędzia informatyczne służące procesowi budownictwu,
- prawo budowlane,
- zarządzanie przedsięwzięciami budowlanymi,
- kształcenie kadr dla budownictwa,
- bezpieczeństwo pracy w budownictwie.

Artykuły problemowe są recenzowane.

Zgodnie z komunikatem Ministra Nauki

z 5 stycznia 2024 r. autor za publikację artykułu w „Przeglądzie Budowlanym” uzyskuje 40 pkt.

„Przegląd Budowlany” jest rejestrowany w bazie danych o zawartości polskich czasopism technicznych BazTech, Index Copernicus Journals Master List, Crossref, Google Scholar oraz POL-index.

Redakcja: ul. Świętokrzyska 14 A,
00-050 Warszawa
tel./faks: (22) 826-67-00
Internet: www.przegladbudowlany.pl
Wersja papierowa czasopisma
jest wersją pierwotną

Redaktor Naczelna:

mgr inż. Grażyna Furmańczyk-Ziemska
biuro@przegladbudowlany.pl

Marketing i reklama: reklama@przegladbudowlany.pl

Redaktor językowy: mgr inż. Teresa Jędrzejewska

Wydawca: Fundacja PZITB

ul. Świętokrzyska 14 A, 00-050 Warszawa

Przewodniczący Fundacji: mgr inż. Dariusz Blocher

Prezes Zarządu Fundacji: mgr inż. Ryszard Trykosko



2 Spis treści

WYDARZENIA

NASZE SPRAWY – AKTUALNOŚCI

- 4 XXV Jubileuszowy Krajowy Zjazd Naukowo-Techniczny Młodej Kadry PZITB – Szymon Karczewski
- 6 III Konferencja Naukowa „Obiekty ochronne i militarne zapewniające bezpieczeństwo w sytuacji zagrożenia” – Zbigniew Augustyniak
- 8 XXVII Ogólnopolska Konferencja Ekologia a Budownictwo – Janusz Kozula
- 10 Kto będzie budował Polskę za 10–20 lat? – Monika Podworna, Łukasz Sadowski, Mateusz Mój
- 12 Powołanie Rady Społeczno-Gospodarczej na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej

JUBILEUSZ WPPK

- 16 XL lat Konferencji „Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji” (WPPK) – Mirosław Boryczko
- 28 Członkowie Honorowi Warsztatów Pracy Projektanta Konstrukcji (WPPK)

POROZUMIENIE DLA BEZPIECZEŃSTWA W BUDOWNICTWIE

- 30 Rusztowania na budowie i nie tylko – kompleksowe spojrzenie – Urszula Gawrysiak, Michał Wrzosek
- 33 Standardy Bezpieczeństwa

ARTYKUŁY PRZEGLĄDOWE

JUBILEUSZ 80-LECIA WBiŚ SGGW

- 39 80 lat kształcenia na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska – Eugeniusz Koda
- 40 Od melioracji do budownictwa i architektury – Eugeniusz Koda, Janusz Kubrak, Grzegorz Majewski

ARTYKUŁY PROBLEMOWE

- 46 Budownictwo w gospodarce o obiegu zamkniętym w ujęciu cyklu życia obiektu – Magdalena Daria Vaverková, Eugeniusz Koda, Anna Podlasek
- 53 Cyfryzacja procesów budowlanych: znaczenie kodów QR i projektowania parametrycznego we współczesnym budownictwie – Anna Piętocha
- 59 Przykłady problemów technicznych związanych z realizacją czasowo przerwanych inwestycji budowlanych – Barbara Francke, Konrad Tracz
- 65 Zastosowanie metod wizji komputerowej i głębokiego uczenia w segmentacji uszkodzeń elementów konstrukcyjnych betonowych – Roman Tracz, Volodymyr Tyvoniuk, Tomasz Wierzbicki
- 70 Logika parametryzacji w budownictwie i architekturze swobodnych form strukturalnych – Anna Stefańska
- 75 Narzędzia projektowania parametrycznego w adaptacyjnym projektowaniu konstrukcji: analiza porównawcza Grasshopper i Dynamo – Małgorzata Kurcusz
- 80 Porównanie metody Galerina i metody Petrova w analizie belki zginanej – Mykola Nagirniak, Mateusz Dryzek
- 85 Model 3D swobodnych drgań anizotropowych kompozytowych powłok cylindrycznych – Volodymyr Trach, Mykola Khoruzhyi, Andrii Podvornyi, Natalia Zhukova
- 90 Wpływ twardości stali zbrojeniowej na jej właściwości wytrzymałościowe – Olga Szlachetka, Marek Henryk Dohojda, Anna Manikowska-Wawrzyniak, Bartłomiej Gogacz
- 95 Budownictwo drewniane – problemy i wyzwania – Urszula Kotwica, Ewa Kotwica, Paweł Sulik
- 99 Katastrofy budowlane obiektów zabytkowych w zabudowie śródmiejskiej – przyczyny, mechanizmy i wnioski projektowe – Paulina Filas-Zając
- 105 Dylematy prefabrykacji wczoraj i dziś. Architektoniczny wymiar projektowania – Jacek Kwiatkowski, Monika Trojanowska, Oskar Amiri
- 111 Porównanie tradycyjnych i nowoczesnych metod prefabrykacji konstrukcji drewnianych i żelbetowych – Justyna Juchimiuk, Michał Golański
- 116 Plomba śródmiejska w kontekście historycznej struktury urbanistycznej. Część I – Alicja Kozarzewska, Katarzyna Jasińska, Jan Damięcki

Rada Naukowa

prof. nadzw. dr hab. inż. Tomasz Z. Błaszczyński
 prof. dr hab. inż. Ewa Błazik Borowa
 dr hab. inż. Janusz Bohatkiewicz
 prof. dr hab. inż. Wiesław Buczkowski
 prof. dr hab. inż. Tadeusz Chmielewski
 prof. dr hab. inż. Jan Deja
 prof. dr hab. inż. Łukasz Drobiec
 dr hab. inż. Wojciech Drozd
 dr inż. Robert Geryło
 dr hab. inż. Tomasz Godlewski
 prof. dr hab. inż. Kazimierz Furtak
 prof. dr hab. inż. Stanisław Gaca
 prof. dr hab. inż. Wiesława Głodkowska
 prof. dr hab. inż. Bożena Hoła
 prof. dr hab. inż. Jacek Hulimka
 prof. dr hab. inż. Maria Kaszyńska
 prof. dr hab. inż. Robert Kowalski
 prof. dr hab. inż. Henryk Nowak
 dr hab. inż. Beata Nowogórska
 prof. dr hab. inż. Adam Podhorecki
 dr hab. inż. Jolanta Prusiel
 prof. dr hab. inż. Elżbieta Radziszewska-Zielina
 dr hab. inż. Teresa Rucińska
 prof. dr hab. inż. Leonard Runkiewicz
 dr hab. inż. Barbara Rymsza
 dr hab. inż. Marek Salamak
 prof. dr hab. inż. Dariusz Skorupka
 prof. dr hab. inż. Anna Sobotka
 dr hab. inż. Jacek Szer
 prof. dr hab. inż. Wiesław Trąpczyński
 dr hab. inż. Ryszard Walentyński
 prof. dr hab. inż. Adam Wysokowski
 prof. Wiktor Kwasza, Hnidec Institute of Building, Lwów
 prof. dr hab. inż. Bogdan Nazarewicz, Politechnika Lwowska
 prof. dr-ing. Piotr Noakowski, Technische Universität Dortmund
 prof. dr inż. Andrzej Nowak, dr h.c. Auburn University, Alabama
 prof. Hartmut Pasternak, BTU Cottbus, Niemcy
 doc. dr inż. Wojciech Roszak, Lund University, Szwecja

Rada Programowa Czasopism i Wydawnictw PZITB w kadencji 2024–2028**Przewodnicząca:** prof. dr hab. inż. Anna Halicka**Wiceprzewodniczący:** prof. dr hab. inż. Jacek Hulimka**Wiceprzewodnicząca:** dr hab. inż. Teresa Rucińska**Sekretarz:** dr inż. Joanna Laskowska-Bury

mgr inż. Włodzimierz Babczyński

dr hab. inż. Bernadeta Dębska

dr hab. inż. Jacek Domski

prof. dr hab. inż. Barbara Goszczyńska

dr hab. inż. Marta Kadela

prof. dr hab. inż. Eugeniusz Koda

dr inż. Marlena Kucz

dr hab. inż. Beata Nowogórska

dr hab. inż. Jolanta Prusiel

prof. dr hab. inż. Elżbieta Radziszewska-Zielina

dr hab. inż. Elżbieta Szafranko

dr hab. Małgorzata Ulewicz

prof. dr hab. inż. Tadeusz Urban

dr hab. inż. Ryszard Walentyński

prof. dr hab. inż. Adam Wysokowski

Kolegium Redakcyjne:

dr inż. Piotr Gryspanowicz

dr inż. Piotr Knyziak

dr inż. Paweł A. Król

dr inż. Wioletta Jackiewicz-Rek

mgr inż. Jan Sieczkowski

dr hab. inż. Anna Szymczak-Graczyk

Redaktor statystyczny: dr hab. inż. Barbara Ksit**Okładka:** Jubileusz 80-lecia WBiŚ SGGW

Cena 1 egz. 44,00 zł (plus 8% VAT)

Prenumerata i sprzedaż: tel./faks: (22) 826-67-00

DTP: mediaNOVA Jacek Gacukowicz**Druk:** Zakład Poligrafii i Kolportażu Wydawnictwa SIGMA-NOT Sp. z o.o.

Materiałów niezamówionych redakcja nie zwraca i zachowuje sobie prawo do skrótów, zmian tytułów i wprowadzania śródtytułów. Nie ponosi też odpowiedzialności za treść reklam.

- 121** Analiza numeryczna bezpieczeństwa geotechnicznego składowiska odpadów projektowanego w warunkach podłoża słabonośnego – Eugeniusz Koda, Marek Bajda, Wiktor Sitek, Mariusz Lech, Zdzisław Skutnik, Piotr Osiński
- 127** Zastosowanie badania dylatometrem płaskim DMT do wyznaczania początkowego modułu ścinania iłów plicieńskich – Simon Rabarijoely, Marek Bajda, Mariusz Lech, Katarzyna Markowska-Lech, Zdzisław Skutnik, Konrad Szczygielski
- 133** Analiza obrazu jako narzędzie oceny kolmatacji geowłóknin oraz zmian ich właściwości filtracyjnych – Anna Markiewicz
- 138** Wpływ narzutu kamiennego na rozwój rozmycia dna w dolnym stanowisku budowli hydrotechnicznej – Łukasz Pietrzyk, Marta Kiraga
- 143** Obiekty mostowe ważnym elementem leśnej infrastruktury drogowej – Tomasz Wierzbicki
- 147** Instalacje fotowoltaiczne na terenach zdegradowanych – uwarunkowania projektowe i ocena wykonalności – Michał Kosakiewicz, Katarzyna Jeleniewicz, Eugeniusz Koda, Magdalena Daria Vaverková, Piotr Gołęgowski

BIM

- 154** Korelacja a kauzacja w badaniach aplikacyjnych nad modelowaniem informacji o obiekcie budowlanym (BIM) – Andrzej Szymon Borkowski

EKOLOGIA A BUDOWNICTWO

- 159** Sztuczna inteligencja w projektowaniu zrównoważonych budynków. Część II. Projektowanie generatywne, wdrożenia i przyszłość SI – Paulina Sanetra, Jan Zamorowski

REWITALIZACJA

- 165** Propozycja metody wstępnej oceny stanu technicznego budynków mieszkalnych jednorodzinnych dla celów rewitalizacji – Tomasz Stanisław Podciborski

INFRASTRUKTURA KOLEJOWA

- 170** Zastosowanie peronów modułowych na polskiej sieci kolejowej – Filip Janowiec, Mateusz Dąbrowski

METODY BADAWCZE

- 175** Wykorzystanie chromatografii cienkowarstwowej oraz analizy widmowej do oceny procesów starzeniowych lepiszczy asfaltowych – Maria Ratajczak, Bartosz Budziński, Paweł Mieczkowski

KONSTRUKCJE – ELEMENTY – MATERIAŁY

- 180** Zastosowanie metod wielokryterialnego wspomaganie decyzji EIPICI i SAW w wyborze zrównoważonej receptury mieszanki betonowej – Wioletta Dobaczewska

VII FORUM BUDOWLANE PŁOCK 2025

- 185** Charakterystyka właściwości stalowych drutów, splotów oraz prętów sprężających na podstawie PN-EN 1992-1-1:2024-05 i prEN 10138. Część II – Anna Jancy

ZIELONA TRANSFORMACJA

- 191** Zielona transformacja: strategiczny proces gospodarczy, czy nadal tylko agenda środowiskowa? – Edyta Baran, Mariusz Hynowski, Jacek Michalak

MODERNIZACJE

- 196** Algorytm postępowania w procesie modernizacji starej kamienicy – Julia Brenk, Barbara Ksit, Maria Walczewska

BHP

- 201** Alkohol przyczyną wypadków przy pracy w opinii biegłego sądowego – Andrzej Dziedzic

WSPOMNIENIA

- 208** Mgr inż. Stefan Czarniecki (1937–2024)



XXV Jubileuszowy Krajowy Zjazd Naukowo-Techniczny Młodej Kadry PZITB

Od 8 do 10 maja 2026 roku odbywał się XXV Jubileuszowy Krajowy Zjazd Naukowo-Techniczny Młodej Kadry PZITB. W wydarzeniu wzięło udział 98 członków Młodej Kadry z 20 Oddziałów Związku. Najliczniej reprezentowanymi były Oddziały: Gliwice, Gdańsk oraz Warszawa.

Partnerami zjazdu byli: POOLAQUA Mariusz Romanowski, Mostostal Zabrze Realizacje Przemysłowe SA, Budizol, GOLDBECK Polska, Grupa NDI, CAS Sp.z o.o., AMW Sinevia, PERI Polska, Aldesa, Milwaukee Tool Polska, Hustro, Rector Polska, Manpower Polska, Budowa 2.0, Hotel Verte. Patronat honorowy nad wydarzeniem objęli: Zarząd Główny PZITB, Fundacja PZITB, Główny Urząd Nadzoru Budowlanego, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska SGGW. Patronat branżowy objęli: Polski Związek Pracodawców Budownictwa, Polska Izba Konstrukcji Stalowych, Związek Mostowców RP, Porozumienie dla Bezpieczeństwa w Budownictwie, zaś patronatu medialnego udzielił: „Przegląd Budowlany”, „Izolacje”, „Inżynieria i Budownictwo”, „Builder”, „Energetyka wodna”.

Zjazd otworzyła VII Konferencja Honor Inżyniera: Realizacje na miarę XXI wieku, współorganizowana z Wydziałem Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej, w której uczestniczyło 250 osób – członkowie Koła Młodych PZITB, uczniowie Technikum Budownictwa i Architektury nr 1 im. Z. Mączyńskiego oraz Technikum Architektoniczno-Budowlanego im. S. Noakowskiego w Warszawie, zaproszeni goście, a także przedstawiciele Patronów i Partnerów wydarzenia. Po siedmiu latach powróciliśmy do Małej Auli Gmachu Głównego Politechniki Warszawskiej, gdzie odbywał się nasz poprzedni, XX Jubileusz. Konferencję otworzyli Katarzyna Sęk – wiceprzewodnicząca Komitetu Młodej Kadry PZITB oraz Hugo Kielar z Koła Młodych przy Oddziale



Warszawskim. Podczas rozpoczęcia głos zabrali: prof. Maria Kaczyńska – przewodnicząca PZITB, prof. Andrzej Garbacz – dziekan Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej, Wioletta Jackiewicz-Rek – wiceprzewodnicząca PZITB, Tomasz Osiecki – dyrektor Departamentu Skarg i Wniosków w Głównym Urzędzie Nadzoru Budowlanego, Ryszard Trykosko oraz Wiktor Piwkowski – członkowie honorowi PZITB. Następnie Szymon Karczewski – przewodniczący Komitetu Młodej Kadry w prelekcji „Stowarzyszenie kluczem do sukcesu. Młoda Kadra PZITB” przedstawił działalność Młodej Kadry w oparciu o strukturę, główne cele, realizowane projekty oraz zalety przynależności do Stowarzyszenia. Dariusz Guzek oraz Karolina Surma z Koła Młodych Oddziału Gliwickiego omówili przygotowania



do tegorocznej realizacji projektu Workcamp MK PZITB, która odbędzie się 18.07–3.08., a remontowanym obiektem będzie Placówka Opiekuńczo-Wychowawcza nr 2 w Rudzie Śląskiej. Celem VII konferencji było pokazanie osiągnięć polskiego przemysłu budowlanego oraz wpływu nowoczesnych technologii, innowacyjnych materiałów, a także zaawansowanych rozwiązań inżynierskich na jego dynamiczny rozwój. W ramach sesji plenarnych wystąpienia wygłosili przedstawiciele firm: POOLAQUA Mariusz Romanowski – Partner Główny, Partnerzy Złoci: Budizol, Grupa NDI, Mostostal Zabrze Realizacje Przemysłowe SA, GOLDBECK Polska, CAS Sp. z o.o. Tomasz Osiecki z Głównego Urzędu Nadzoru Budowlanego opowiedział o możliwościach, jakie daje inżynierom Centralny Rejestr Upoważnień Budowlanych. Uczestnicy mieli okazję również odwiedzić stoiska partnerów, gdzie mogli zasięgnąć wielu przydatnych informacji nt. możliwości, jakie daje rynek budowlany. Podsumowaniem konferencji była debata inżynierska, podczas której młodzi inżynierowie opowiadali o wyzwaniach, z jakimi musieli mierzyć się na starcie kariery, rosnącej roli cyfryzacji oraz racjonalnym prowadzeniu realizacji.

W piątkowy wieczór, w Restauracji Wilanów, odbył się uroczysty bankiet, podczas którego Szymon Karczewski podsumował dotychczasową działalność Młodej Kadry. Podkreślona została również praca członków Komitetu Organizacyjnego Zjazdu, w którym działali: Katarzyna Sęk, Elżbieta Gortych, Aleksandra Kamińska, Marzena Chabowska, Oliwia Belta, Maria Szumielewicz, Zuzanna Rudnicka, Hugo Kielar, Marcin Tryka, Michał Wojciechowski, Ariel Jabłoński, Paweł Wasilewski. Pamiątkowe statuetki za wkład w działalność Komitetu Młodej Kadry otrzymali: Wioletta Jackiewicz-Rek, Tomasz Bujnowski, Michał Bał, Justyna Pitala, Marcin Tryka. Zwieńczeniem bankietu było wręczenie prof. Marii Kaszyńskiej statuetki za całokształt współpracy z młodzieżą.

Drugiego dnia zjazdu uczestnicy mieli okazję wziąć udział w aktywnościach technicznych i szkoleniowych. Sobotę rozpoczęto w czterech miejscach Warszawy. W Centrum Samorządowca SGGW członkowie Młodej Kadry uczestniczyli w szkoleniu z zakresu sztucznej inteligencji w budownictwie przeprowadzonym przez Grzegorza Szalewicza z Budowa 2.0 – Partnera Merytorycznego Zjazdu. Warsztaty pokazały rosnące znaczenie narzędzi, które dobrze wykorzystane dają możliwości optymalizacji pracy i stają się źródłem przewagi na rynku. Kolejna grupa wzięła udział w wycieczce technicznej nt. rewitalizacji Hotelu

Verte, który jest jedną z wizytówek Starego Miasta. Młodzi inżynierowie zapoznali się z procesem modernizacji w reżimie konserwatorskim, zastosowanymi elementami prefabrykowanymi oraz historią obiektu. Następnie grupa udała się na zwiedzanie Krakowskiego Przedmieścia z Grażyną Furmańczyk-Ziemińską, która przybliżyła historię tej części Warszawy. Pozostałe dwie grupy wybrały się na place budów. Pierwsza z nich odwiedziła budowę pierwszego etapu Sinfonia Varsovia Centrum, obejmującą modernizację trzech zabytkowych budynków dawnego Instytutu Weterynaryjnego przy ul. Grochowskiej. Powstaną tam kameralna sala koncertowa, sale prób oraz przestrzeń edukacyjną. Inwestycja realizowana jest przez Grupę Doraco. Drugą grupę przyjęła firma Goldbeck Polska – Złoty Partner Zjazdu. Podczas wycieczki uczestnicy poznali tajniki realizacji obiektu Lemon Tree zlokalizowanego przy ul. Osmańskiej 5.



W sobotnie popołudnie Młoda Kadra udała się na spotkanie networkingowe „Rzuć wyzwanie inżynierowi”, które otworzyła prelekcja nt. możliwości rozwoju oraz sytuacji na rynku pracy w sektorze budownictwa. Wystąpienie wygłosiły Olga Nowakiewicz oraz Anna Rydzewska z Manpower Polska – Partnera Merytorycznego Zjazdu. Prezentacja była doskonałym wstępem do dyskusji i źródłem wielu pytań uczestników. Po prelekcji była okazja do skorzystania z konsultacji CV. Networking „Rzuć wyzwanie inżynierowi” poprowadzili: Aleksandra Kamińska – PZITB Oddział Opole oraz Ariel Jabłoński – PZITB Oddział Gdańsk. Aktywność składała się z dwóch części: integracja na zasadzie „speed-datingu” – trzech serii 3-minutowych rozmów zapoznawczych między uczestnikami.

Potem nastąpił podział na 7 grup, z których każda otrzymała pytania inżynierskie związane z rozwiązywaniem trudnych sytuacji na placu budowy. Poprzez różnicowane doświadczenie członków Młodej Kadry w zawodzie była to dobra okazja do wymiany doświadczeń. Ostatni punkt zjazdu stanowiła impreza integracyjna, podczas której ogłoszono, że kolejna edycja zjazdu planowana jest na maj 2027 i odbędzie się w Opolu.

Szymon Karczewski
Przewodniczący Komitetu Młodej Kadry PZITB

III Konferencja Naukowa „Obiekty ochronne i militarne zapewniające bezpieczeństwo w sytuacji zagrożenia”

W Szwecji i Wałcu 18 i 19 września 2025 roku odbyła się III Konferencja Naukowa pt. „Obiekty ochronne i militarne zapewniające bezpieczeństwo w sytuacji zagrożenia”.

Pomysłodawcą i głównym organizatorem odbywających się od wielu lat w Wałcu konferencji, gromadzących przedstawicieli szeroko pojmowanego środowiska budowlanego, a także akademickiego i samorządowego jest były Powiatowy Inspektor Nadzoru Budowlanego w Wałcu Zbigniew Augustyniak, występujący jako koordynator Zachodniopomorskiej Okręgowej Izby Inżynierów Budownictwa w Wałcu. W organizacji cyklicznych wydarzeń pomagają mu m.in. kierownik biura ZOIB w Wałcu Eleonora Puzo i Roman Dec z PZITB. Współorganizatorami tegorocznej konferencji byli: Starostwo Powiatowe w Wałcu, ZOIB w Szczecinie, PCKZiU w Wałcu, Branżowe Centrum Umiejętności w Wałcu oraz mirosławieckie i ogólne koła PZITB ZO w Poznaniu..

Pierwszy dzień poświęcony był przede wszystkim historii walk o przełamanie Wału Pomorskiego w czasie II wojny światowej. Rozpoczął się od zwiedzania Muzeum Militarnej w Szwecji, po którym uczniów klasy mundurowej PCKZiU oprowadził twórca i właściciel tego obiektu Adam Mendryk. Następnie wykład pt. „Śladami walk o Wał Pomorski” wygłosił były wojewoda poznański dr inż. Włodzimierz Łęcki. Po jego zakończeniu młodzież pod kierunkiem płk. rez. Mariana Bobelaka i pod opieką nauczycieli J. Rachubińskiego i W. Ptaka pojechała do Zdbic na zwiedzanie miejsc, gdzie toczyły się najcięższe walki o przełamanie silnie umocnionego pasa niemieckiej obrony. W godzinach popołudniowych pozostali uczestnicy wysłuchali interesującego wykładu płk. rez. Mariana Bobelaka, po którym odbyła się również ożywiona dyskusja, jaką przeprowadził mieszkaniec Szwecji, radny gminny Ryszard Kwaśnica. Miejscem drugiego dnia konferencji był niedawno oddany do użytku obiekt Branżowego Centrum Umiejętności w Wałcu. Gości powitali: dyrektor BCU Magdalena Ceraży, dyrektor PCKZiU Piotr Filipiak oraz Zbigniew Augustyniak. Oprócz uczniów klas mundurowych PCKZiU na sali zasiedli m.in. rektor



Widok ogólny sali z uczestnikami konferencji



Prezentacja historii warsztatów i konferencji organizowanych w Wałcu – Zbigniew Augustyniak

Wyższej Szkoły Komunikacji i Zarządzania w Poznaniu prof. Jerzy Olszewski, skarbnik ZOIB w Szczecinie Sylwester Gadomski, prezes NOT w Pile Bernard Bartosik oraz nauczyciele PCKZiU. Na konferencję złożył się cykl wykładów. Prof. ANS i starosta wałecki Bogdan Wankiewicz zatytułował swoje wystąpienie „Ochrona ludności i obrona cywilna gwarantem bezpieczeństwa”, wicestarosta Jan Grudziński mówił o lasach w kontekście zapewnienia

bezpieczeństwa w sytuacji zagrożenia, dowódca KP PSP w Wałcu Marcin Kulczyk przedstawił działania operacyjne PSP w zakresie budowli ochronnych, Powiatowy Inspektor Nadzoru Budowlanego ocenił stan techniczny obiektów ochronnych na terenie powiatu, naczelnik Wydziału Zarządzania Kryzysowego, Bezpieczeństwa i Spraw Obywatelskich i Informatyki Starostwa Powiatowego w Wałcu Wojciech Pastuszek omówił organizację i funkcjonowanie Powiatowego Centrum Zarządzania Kryzysowego w Wałcu, a Mateusz Olszewski z WSKiZ w Poznaniu przybliżył rolę dronów we współczesnych konfliktach zbrojnych. Zbigniew Augustyniak poświęcił swój wykład projektowaniu i budowie obiektów ochronnych, absolwent WAT w Warszawie Łukasz Żygadło zwrócił uwagę na zagrożenia wewnętrzne dla ludności zgromadzonej w schronach i miejscach ukrycia w przypadku zagrożenia,

a konferencję zakończył wykład prof. Jerzego Olszewskiego pt. „Obiekty militarne na Wale Pomorskim”.

– Myślę, że konferencję można uznać za udaną i wartościową – podsumował Zbigniew Augustyniak. – Udało nam się obalić kilka mitów, dotyczących walk o przełamanie Wału Pomorskiego oraz zdefiniować zagrożenia, występujące w związku z realnym zagrożeniem naszych granic, bezpieczeństwa państwa i ludności cywilnej.

mgr inż. Zbigniew Augustyniak
Koordynator Lokalny ZOIB

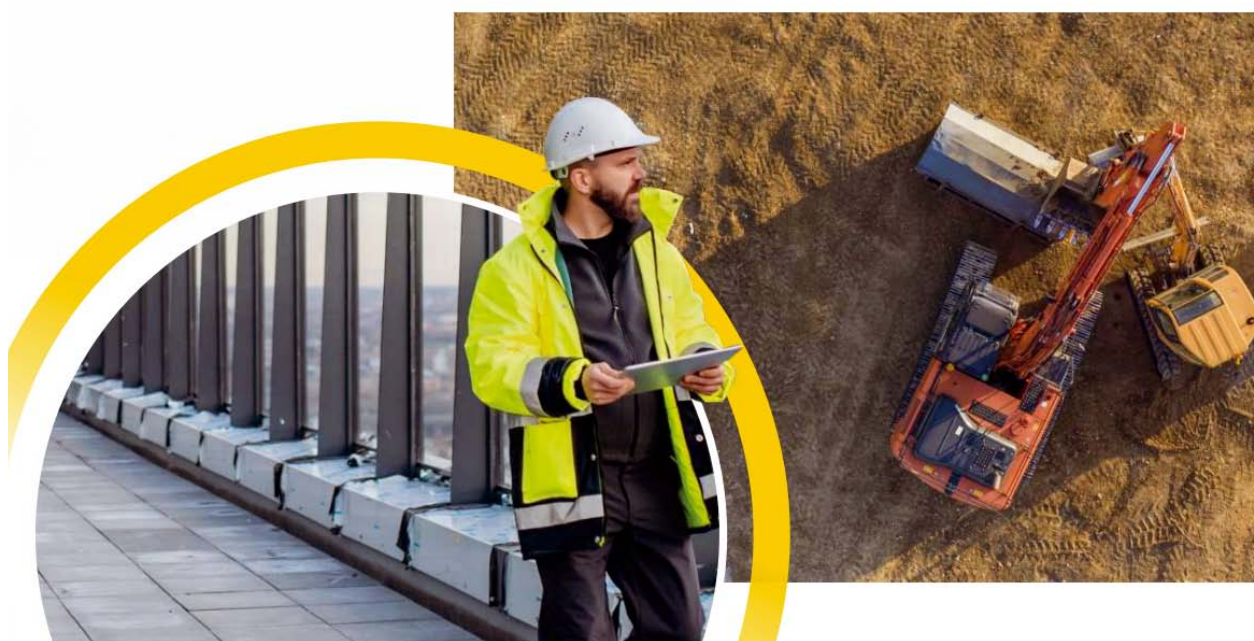
budimex

Dołącz do jednego z naszych kontraktów!

**ZMIENIAJ
Z NAMI
ŚWIAT**



@karierabudimex | budimex.pl | rekrutacja@budimex.pl



XXVII Ogólnopolska Konferencja Ekologia a Budownictwo



XXVII Ogólnopolska Konferencja Ekologia a Budownictwo miała miejsce 16–18 października 2025 r. w Bielsku-Białej. Organizatorem był Oddział Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa z Bielska-Białej przy współpracy Instytutu Techniki Budowlanej w Warszawie i Komitetu Ekologii ZG PZITB.

Kolejna edycja cyklicznego wydarzenia odbywała się już niestety bez prof. Leonarda Runkiewicza. Patronat branżowy nad konferencją pełniły Polska Izba Inżynierów Budownictwa oraz Śląska Okręgowa Izba Inżynierów Budownictwa. Natomiast jej wysoki poziom merytoryczny zapewniła rada naukowo-techniczna, której przewodniczył prof. Tomasz Błaszczynski.

XXVII Ogólnopolska Konferencja Ekologia a Budownictwo odbyła się w trybie stacjonarnym. Otworzyli ją Bogusław Rudziński, przewodniczący Oddziału PZITB w Bielsku-Białej, i Janusz Kozula, przewodniczący komitetu organizacyjnego, następnie uczestników przywiteli: Piotr Kucia, zastępca Prezydenta Miasta Bielska-Białej, oraz Roman Karwowski, przewodniczący Rady Śląskiej OIIB. W czasie spotkania przedstawiono 28 referatów, które wygłoszono w 7 sesjach tematycznych. Nowością był referat wprowadzający Jana Zamorowskiego i Pauliny Sanetry, zaprezentowany w konwencji sztucznej inteligencji, pt. „Sztuczna inteligencja w projektowaniu ekologicznych budynków”. W tym roku prelegenci poruszali tematy: ekologii i śladu węglowego, drewna oraz materiałów naturalnych, zabytków

i ochrony środowiska, budownictwa zrównoważonego oraz awaryjności i diagnostyki. Tradycyjnie po każdej sesji odbywały się też dyskusje, w których uczestniczyli wykładowcy oraz słuchacze. Zaprezentowane referaty zostały opublikowane w „Przeglądzie Budowlanym”.

W nawiązaniu do poprzednich lat zorganizowano Salonik Wystawców. Prezentowały się tam firmy z propozycjami nowych technologii oraz wyrobów budowlanych: Dantherm Group, Pilch Innowacje, Remmers i Sempre.

Konferencja stanowiła kompleksowe forum wymiany wiedzy na temat zrównoważonego rozwoju w sektorze budowlanym. Głównymi obszarami tematycznymi były: obliczanie oraz redukcja śladu węglowego materiałów i całych budynków, wykorzystanie naturalnych surowców, takich jak drewno, a także inteligentne i modułowe projektowanie. Konferencja połączyła zagadnienia technologiczne, materiałowe i środowiskowe, ukazując holistyczne podejście do ekologii w budownictwie.

W konferencji uczestniczyło ok. 80 osób, w tym także studenci Wydziału Inżynierii Materiałów, Budownictwa i Śro-



dowiska Uniwersytetu Bielsko-Bialskiego. Organizacją zajmował się zespół organizacyjny, w skład którego wchodził: Janusz Kozula, Przemysław Pępek, Bogusław Rudziński oraz Ewa Anczakowska i Ewa Keiper z biura Oddziału PZITB w Bielsku-Białej.

Partnerami merytorycznymi byli: Austrotherm, Dantherm Group, Sempre, Remmers, Building Trust Sika, STO oraz Pilch Innowacje.

Janusz Kozula

Slab Track – witamy w Polsce!



PORR S.A. jest Generalnym Wykonawcą przystanku kolejowego Przylasek Rusiecki na linii kolejowej nr 95, przy budowie którego po raz pierwszy w Polsce zastosowano nawierzchnię bezpodsypkową Slab Track Austria.

PORR
porr.pl

Kto będzie budował Polskę za 10–20 lat?

To pytanie coraz częściej pojawia się dziś w dyskusjach o przyszłości branży budowlanej. Firmy szukają inżynierów, uczelnie próbują dostosować kształcenie do zmieniającego się rynku pracy, a jednocześnie cały sektor stoi przed wyzwaniami związanymi z dekarbonizacją, ograniczaniem śladu węglowego i wdrażaniem nowych technologii materiałowych.

Właśnie wokół tych wyzwań koncentrowały się w ostatnich miesiącach działania realizowane na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej. Ich wspólnym mianownikiem było połączenie edukacji, nowoczesnych badań oraz współpracy z branżą budowlaną.

Jednym z najważniejszych wydarzeń była organizacja etapu centralnego V edycji Ogólnopolskiej Olimpiady Wiedzy o Procesie Inwestycyjno-Budowlanym. 16–17 kwietnia 2026 roku Politechnika Wrocławska gościła finalistów z 32 szkół technicznych z całej Polski. Uczniowie mierzyli się z zagadnieniami związanymi z procesem inwestycyjnym, prawem budowlanym, organizacją robót oraz praktycznymi aspektami realizacji inwestycji. Olimpiada od kilku lat buduje swoją pozycję jako jedna z najważniejszych inicjatyw popularyzujących budownictwo wśród młodzieży szkół średnich. Dla wielu uczestników jest to pierwszy kontakt z uczelnią techniczną i okazja do zobaczenia, jak bardzo współczesne budownictwo różni się od stereotypowego postrzegania tej branży. Coraz częściej mówi się tu nie tylko o konstrukcjach i placach budowy, ale również o nowych materiałach, cyfryzacji, sztucznej inteligencji czy neutralności klimatycznej.

Te same tematy rozwijane są obecnie w działalności badawczej prowadzonej na wydziale. Jednym z realizowanych przedsięwzięć jest projekt SPHERE „Inteligentne technologie wytwarzania betonu na bazie odpadowego żużla pomiedziowego wzbogaconego CO₂ wychwytywanym z produkcji przemysłowej dla zeroemisyjnego budownictwa”, finansowany przez Fundację na rzecz Nauki Polskiej w ramach programu Fundusze Europejskie dla Nowoczesnej Gospodarki.

Projekt koncentruje się na wykorzystaniu materiałów odpadowych oraz zagospodarowaniu CO₂ w technologiach materiałów budowlanych. W praktyce oznacza to badania nad rozwiązaniami, które w przyszłości mogą ograniczać emisyjność budownictwa i wspierać rozwój gospodarki obiegu zamkniętego. Istotnym elementem projektu SPHERE są również działania popularyzujące tematykę nowoczesnego i zrównoważonego budownictwa. W ostatnich miesiącach na wydziale odbyły się seminaria poświęcone materiałom i technologiom przyszłości. Wśród zaproszonych gości znaleźli się m.in.: prof. Zbigniew Giergiczny z Politechniki



Śląskiej, prof. Chi Sun Poon z The Hong Kong Polytechnic University oraz prof. Branko Šavija z TU Delft. Spotkania dotyczyły m.in. betonów o obniżonym śladzie węglowym, koncepcji „Net Zero Concrete” oraz trwałości nowoczesnych materiałów cementowych.

Zmienia się jednak nie tylko zakres badań, ale również samo podejście do kształcenia przyszłych inżynierów. W ramach rekrutacji letniej 2026 wydział planuje uruchomienie pilotażowej organizacji studiów II stopnia na kierunku Budownictwo, specjalność Konstrukcje budowlane. Nowy model ma ułatwić studentom łączenie studiów z pracą zawodową już na etapie studiów magisterskich.

Poniedziałki przeznaczone będą głównie na wykłady prowadzone stacjonarnie z możliwością uczestnictwa online, wtorki i środy na zajęcia projektowe i laboratoryjne, natomiast czwartki i piątki pozostaną w większym stopniu dostępne na praktyki, staże i pracę w przedsiębiorstwach branżowych. Celem projektu nie jest odejście od studiów stacjonarnych, ale lepsze dostosowanie organizacji zajęć do realiów współczesnego rynku pracy.

Wszystkie te działania, od olimpiady, przez projekt SPHERE, po nowe rozwiązania dydaktyczne, łączy wspólny cel: przygotowanie młodych ludzi do funkcjonowania w branży budowlanej, która w najbliższych latach będzie przechodziła jedną z największych transformacji w swojej historii.



dr hab. inż. Monika Podwórna,
prof. uczelni
prof. dr hab. inż. Łukasz Sadowski,
mgr inż. Mateusz Moj,
Politechnika Wrocławska



Politechnika
Wrocławska



XV KONFERENCJA NAUKOWO-TECHNICZNA

BUDOWNICTWO W ENERGETYCE

13–16 października 2026 r., Karpacz

www.konferencja-budownictwo-w-energetyce.pl

www.stow-staszica.org



ANTALYA

20-22 OCTOBER 2026

CALL FOR PAPERS

JOIN NOW

ICPIC2026

**18TH INTERNATIONAL
CONGRESS ON POLYMERS
IN CONCRETE**

ADVANCED C-PC IN CONSTRUCTION

Antalya, Turkey
October 20 – 22th, 2026



ORGANIZATION

General Committee

General Chair: Prof. Dr. Andrzej Garbacz
Warsaw University of Technology, Poland.
President of the International Congress
on Polymers in Concrete.

Vice General Chair: Prof. Dr. Nabi Ibadov
Warsaw University of Technology, Poland.

Vice General Chair: Prof. Dr. İsmail Serkan ÜNCÜ
Isparta University of Applied Sciences, Türkiye.

Organizing Committee

Chair: Prof. Dr. İsmail Serkan ÜNCÜ
Toberli Arge Türkiye.

Vice Chair: Prof. Dr. Nabi Ibadov
Warsaw University
of Technology, Poland.



TOBERLI

Abstract Submission Deadline
July 15, 2026



For More Information:

icpic26.org



Powołanie Rady Społeczno-Gospodarczej na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej

Decyzją rektora Politechniki Warszawskiej z 20 marca 2026 r. została powołana Rada Społeczno-Gospodarcza na Wydziale Inżynierii Lądowej na kadencję trwającą do 31 sierpnia 2028 r.

Powołanie rady stanowi istotny krok w kierunku dalszego rozwoju współpracy wydziału z otoczeniem społeczno-gospodarczym oraz wzmacniania relacji z przedstawicielami kluczowych sektorów gospodarki związanych z budownictwem i infrastrukturą.

Na funkcję przewodniczącej rady została powołana Anna Oleksiewicz, natomiast funkcję sekretarza rady objął Krzysztof Kaczorek – pełnomocnik dziekana ds. współpracy z Radą Społeczno-Gospodarczą.

Uroczyste powołanie członków rady odbyło się 1 kwietnia 2026 z udziałem władz Wydziału Inżynierii Lądowej.

Do podstawowych zadań Rady Społeczno-Gospodarczej należeć będzie:

- zacieśnianie współpracy wydziału z otoczeniem społeczno-gospodarczym,
 - wspieranie wydziału w kreowaniu kierunków strategicznego rozwoju,
 - inicjowanie i wspieranie działań na rzecz studentów i absolwentów, w szczególności w zakresie ich rozwoju zawodowego oraz dostosowania kompetencji do potrzeb rynku pracy.
- W skład rady weszli wybitni przedstawiciele środowiska gospodarczego, instytucji publicznych, organizacji branżowych oraz eksperci związani z sektorem budownictwa i infrastruktury.

Decyzją rektora powołani zostali: Dariusz Blocher, Janusz Bohatkiewicz, Jacek Boruc, Zbigniew Czajewski, Tomasz Darowski,

Rafał Domański, Przemysław Drapała, Wioletta Fabrycka, Olaf Fatalski, Adrian Furgalski, Grażyna Furmańczyk-Ziemnińska, Marek Garliński, Urszula Gawrysiak, Robert Geryło, Maciej Gładys, Leszek Gołąbicki, Mariusz Górecki, Michał Gryś, Elżbieta Janiszewska-Kuropatwa, Maciej Jeżewski, Maciej Kaczorek, Andrzej Kasprzak, Dariusz Kolasa, Robert Kuczyński, Tomasz Kwieciński, Jerzy Lejk, Michał Lejk, Grażyna Lendzion, Łukasz Ławniczak, Ilona Łącka, Andrzej Minasowicz, Tomasz Olej, Anna Oleksiewicz, Tomasz Oracz, Paweł Pichniarczyk, Wiktor Piwkowski, Artur Popko, Andrzej Przesmycki, Andrzej Sas, Janusz Sobieraj, Artur Sokołowski, Katarzyna Stefańska, Rafał Szczypa, Angelika Szufel, Wojciech Szwejkowski, Jarosław Wielopolski, Łukasz Wieruszewski, Krystyna Wiśniewska, Michał Wrzosek, Konrad Wyrrwas, Mariusz Zabielski, Bartosz Zamara, Marek Zdziebłowski, Ernest Ziębaczewski, Józef Zubelewicz.

Powołanie Rady Społeczno-Gospodarczej stanowi ważny element budowania trwałych relacji pomiędzy środowiskiem akademickim a praktyką gospodarczą oraz wzmacniania roli Wydziału Inżynierii Lądowej jako nowoczesnego ośrodka kształcenia i badań, odpowiadającego na aktualne wyzwania rynku i gospodarki.

il.pw.edu.pl

W imieniu Fundacji PZITB i redakcji „Przeglądu Budowlanego” dziękujemy bardzo za powołanie do Rady Społeczno-Gospodarczej na WIL PW.

Na zdjęciu: Ciepłownia biomasowa w Elku



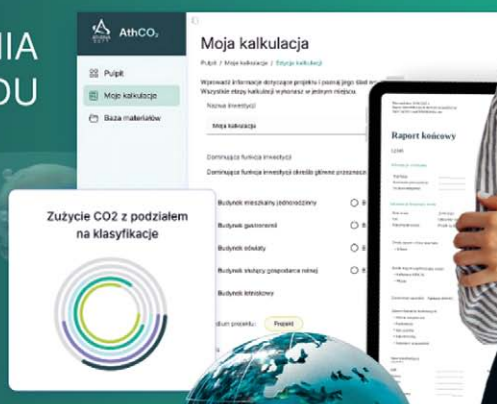
CZAS NA ENERGETYKĘ



www.unibep.pl

Kalkulator AthCO₂

APLIKACJA DO LICZENIA
WBUDOWANEGO ŚLADU
WĘGLOWEGO



XXIV KONFERENCJA NAUKOWO-TECHNICZNA

KONTRA 2026

TRWAŁOŚĆ BUDOWLI I OCHRONA PRZED KOROZJĄ

Cedzyna, 7-9 października 2026 r.



TEMATYKA KONFERENCJI

- odporność materiałów budowlanych na działanie agresywnych czynników zewnętrznych,
- trwałość i ochrona przed korozją konstrukcji żelbetowych, stalowych, drewnianych i murowych,
- trwałość szkła budowlanego,
- trwałość nawierzchni drogowych i mostów,
- modelowanie procesów degradacji materiału i konstrukcji, badania laboratoryjne,
- metody diagnostyki korozyjnej konstrukcji,
- wyroby antykorozyjne, systemy naprawcze, technologie prac antykorozyjnych i metody napraw,
- gospodarka obiegu zamkniętego – kryterium trwałości,
- zbrojenie rozproszone – mikrostruktura – trwałość – sesja pamięci prof. A. M. Brandta

WAŻNE DATY

- 30.04.2026** r. - zgłoszenie uczestnictwa, tematu artykułu lub informacji o wystąpieniu promocyjnym
31.05.2026 r. - przesłanie pełnych tekstów artykułów i wniesienie opłaty konferencyjnej
15.09.2026 r. - przesłanie uczestnikom Komunikatu nr 2 z programem konferencji

ORGANIZATORZY:



Komitety Trwałości Budowli
Zarządu Głównego PZITB
PZITB Oddział Warszawski



Wydział Inżynierii Lądowej
Politechnika Warszawska

KONTAKT: e-mail: kontra@zgpozitb.org.pl, www.kontra.il.pw.edu.pl



wacetob.com.pl

rok założenia 1982



EKSPERTYZY, OPINIE TECHNICZNE, OPINIE SĄDOWE

Ocena stanu technicznego budynków i budowli
Ocena przyczyn powstawania uszkodzeń, awarii
Opracowania dotyczące koniecznych napraw, wzmocnień, modernizacji
z określeniem technologii wykonania i określeniem kosztów
Kontrole obiektów budowlanych
Audyty techniczne Due Diligence
Audyty energetyczne

WSPARCIE W REALIZACJI INWESTYCJI BUDOWLANYCH

Doradztwo i przygotowanie przetargów na realizację inwestycji budowlanych
Nadzór inwestorski
Nadzorowanie robót w obiektach zabytkowych
Doradztwo techniczne
Doradztwo kontraktowe

OPRACOWANIA Z ZAKRESU EKONOMIKI BUDOWNICTWA

Sporządzanie i weryfikacja:
przedmiarów robót, kosztorysów inwestorskich, ofertowych, zamiennych
i powykonawczych
Audyty kosztowy przedsięwzięć budowlanych

SZACOWANIE WARTOŚCI

nieruchomości, nakładów inwestycyjnych



XL lat Konferencji „Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji” (WPPK)

Idea techniczno-warsztatowych konferencji budownictwa powstała w Zarządzie Głównym Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa na początku lat 80. ub. wieku. Związkiem kierował wówczas profesor Jerzy Łempicki.

Profesor uznawał za niezbędne, by środowisko inżynierskie pracujące zawodowo przy projektowaniu budownictwa miało możliwość okresowego spotykania się w celu doskonalenia umiejętności zawodowych: poszerzania wiedzy technicznej, ulepszania warsztatu pracy, wymiany doświadczeń, przedstawienia zaprojektowanych obiektów. Trzeba tu zaznaczyć, że wspomniany okres sprzed 40 lat, kiedy inżynierowie byli zatrudnieni w państwowych biurach projektów: dużych jednostkach organizacyjnych, gdzie projektujący inżynier stanowił częstkę wieloszczeblowej organizacji. Profesor Łempicki, dążąc do realizacji swojej idei, starał się wzbudzić zapał kolegów zebranych w komisji regulaminowej Zarządu Głównego, funkcjonującej wówczas pod nazwą Komitetu Projektowania. Niestety namowy i starania prezesa nie znalazły odzewu w tym gronie. Przez kilka lat działań ówczesnego składu Komitetu Projektowania ZG PZITB pomysł zorganizowania specjalistycznej konferencji środowiskowej nie został zrealizowany.

Idea spotkań warsztatowych, niezmiennie propagowana przez prof. Jerzego Łempickiego, podjęta została przez kolegów z Oddziału PZITB w Krakowie, którego przewodniczącym był prof. Janusz Kawecki. Podczas prac nad programem merytorycznym i stałymi założeniami organizacyjnymi ogólnopolskich konferencji ustalono dwie zasadnicze dla „przyszłego życia” tego typu spotkań, sprawy:

- zarząd krakowskiego oddziału Związku zaprosił do stałej współpracy kolegów ze śląskiego środowiska projektantów, zrzeszonych w oddziałach katowickim i gliwickim PZITB,
- ustalono, do dziś funkcjonujące, tytuł-hasło tych spotkań: Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji – w skrócie WPPK. W roku 1995 zostali zaproszeni do grona stałych organizatorów koledzy z bielsko-bialskiego oddziału związku. Te cztery oddziały są odpowiedzialne za bezpośrednią organizację corocznych warsztatów, a w stałym Komitecie Organizacyjnym działają ich przedstawiciele oraz przewodniczący zarządów oddziału.

Założenia programowe ogólnopolskiej konferencji inżynierów-praktyków wykonujących zawód projektanta, opracowane dla pierwszych warsztatów w 1986 roku, były następujące:

- przedstawić uczestnikom ciekawe rozwiązania projektowe, ich szczegóły i sposoby rozwiązań warsztatowych,
- przygotować i wygłosić ustalone w programie referaty techniczne, związane z tematyką danej konferencji,
- umożliwić bezpośredni kontakt: rozmowę, wymianę uwag

i poglądów uczestników z autorami projektów w specjalnie pomyślanej organizacji konferencji,

- podjąć problematykę norm technicznych do projektowania,
- podjąć tematykę tworzących się ówczesnie zasad i programów komputerowych do projektowania, zaprezentować pracę na sprzęcie, wówczas stanowiącym nowość dla wielu uczestników,
- stworzyć płaszczyznę dla poznawania się i nawiązywania znajomości projektantów z różnych ośrodków i organizacji projektujących oraz podejmowania kontaktów.

Założenie, że co roku bezpośrednim organizatorem warsztatów jest inny oddział związku, spośród stałych patronów konferencji, miało zapewnić ciągle aktualizowanie pomysłów, rozszerzanie programu i stosowanie form budzących zainteresowanie uczestników, zresztą licznie przez nich inicjowanych. W pierwszych czterech konferencjach wzięło udział aż około 300 osób. Dla tak dużego grona istotne było przygotowanie ciekawego programu pozwalającego obecnym czynnie uczestniczyć w konferencji. W dalszych latach, gdy konferencja przeniosła się do ośrodka wczasowego w Ustroniu na Śląsku (na kolejne 14 lat!), programem konferencji obejmowano całe dni, czasem do późnego wieczora. Nazywano wówczas te zjazdy, odbywane przez kilka kolejnych lat w mniejszym gronie uczestników, „konferencjami w pantoflach”, bo miejsca obrad i mieszkania były w tym samym budynku, a czas nie ograniczał uczestników i organizatorów. Wtedy właśnie szczególnym zainteresowaniem cieszyły się bezpośrednie rozmowy z referentami, profesorami i pracownikami naukowymi, którzy licznie zapraszani, dawali możliwość uczestnikom – projektantom – konsultowania zagadnień zawodowych. Przez kilka kolejnych lat były to przede wszystkim niejasności i nowości z wprowadzanych wówczas norm technicznych (żelbetowej i stalowej) i ich stosowania w projektowaniu. Na wiosnę 1998 roku doszliśmy do wniosku, że dotychczasowa formuła warsztatów wyczerpała się. Objawiło się to zarówno trudnościami w ustaleniu tematyki, spadkiem zainteresowania przez autorów w zamieszczaniu referatów, jak i spadkiem zainteresowania uczestników. Postanowiono zmienić formułę warsztatów i z konferencji o charakterze techniczno-naukowym przejść do rzeczywistego warsztatu o charakterze czysto szkoleniowym. Uznaliśmy, że projektant potrzebuje przede wszystkim uwspółcześnienia wiedzy praktycznej i właśnie taką wiedzę, na najwyższym poziomie, powinien na warsztatach uzyskać.

W ślad za tym przyjęto, że podstawowe znaczenie ma materiał pisany, po który zawsze można sięgnąć później, a treść podana podczas wykładów ma jedynie wskazać na ciekawsze zagadnienia tam zawarte. Ambicją organizatorów było i jest, aby uczestnik warsztatów mógł skompletować biblioteczkę wiedzy, w pełni aktualnej, na podstawowe tematy interesujące projektanta.

Współorganizatorami konferencji są cztery oddziały PZITB, dlatego każdy z nich objął prowadzenie na kolejnych warsztatach wyodrębnionej tematyki. I tak przypisano jako główne tematy:

- Oddziałowi Gliwickiemu – konstrukcje z betonu,
- Oddziałowi Bielsko-Bialskiemu – budownictwo ogólne, a głównie konstrukcje murowe, stropy itp.,
- Oddziałowi Katowickiemu – konstrukcje metalowe,
- Oddziałowi Krakowskiemu – zagadnienia fundamentowania.

Kolejne czteroletnie cykle miały przyjęty zakres – który określono: w latach 1998–2001 jako „Naprawy i wzmocnienia konstrukcji”, w latach 2002–2005 jako „Nowości w konstrukcjach”, w latach 2006–2009 jako „Naprawy i wzmocnienia konstrukcji”.

W 2006 roku zaczęto powtarzać cykl, wychodząc z założenia, że po 8 latach nastąpiły istotne zmiany w wiedzy inżynierskiej i w życie zawodowe weszło nowe pokolenie projektantów tej wiedzy potrzebujące.

Przekształcenie formuły konferencji na czysto szkoleniową oraz ambicja stworzenia każdorazowo podręcznika na omawiany temat wymusiły zmiany organizacji warsztatów. Są one w istocie kursem szkoleniowym i, jak każdy kurs, mają dać pełną wiedzę na rozważany temat. Wymaga to, po pierwsze, rozpisania scenariusza, jak spisu rozdziałów książki. Następnie w celu zrealizowania tego scenariusza poszukiwani są wykładowcy, wybitni specjaliści określonej tematyki, którzy podejmą się napisać, a potem wygłosić poszczególne wykłady. Założono, że tematyka każdego wykładu będzie stosunkowo wąska. Inaczej niż na chyba wszystkich innych konferencjach, zasugerowano autorom, aby referat w części pisanej nie liczył mniej niż 24 strony. Chodziło bowiem o wyczerpujące opracowanie omawianej tematyki. Górnej granicy objętości nie ograniczano. W efekcie zdarzył się tekst, który zajął 90 stron. Ramy czasowe warsztatów wymagają ograniczenia liczby wykładów do około 32, dlatego podział tematyki pomiędzy wykładowców musi być precyzyjny. Otrzymują oni szczegółowo rozpisany minimalny zakres referatu, co oczywiście nie ogranicza szerszych omówień. Jednak szczegółowe rozpisanie wymagań organizatorów pozwala mniemać, iż w efekcie zarysowana tematyka zostanie podczas warsztatów w pełni omówiona, bo poszczególne wykłady będą wzajemnie się uzupełniać, a nie powtarzać. Przez minione lata większość autorów rzetelnie starała się wypełnić określony zakres tematyczny. Praktycznie nie odmówiono opracowania wykładu, zwykle bardzo pracochłonnego. Za ten

trud należy się wykładowcom warsztatów uznanie i specjalne podziękowanie. Warto wspomnieć, że część z tych wykładów przerodziło się potem w szereg rozmaitych publikacji, a nawet w cenne książki.

Wykłady pogrupowane są w monotematyczne sesje. W czwartek i piątek organizuje się sesje dyskusyjne nad wszystkimi wykładami dnia, w których uczestniczą także autorzy. Sesje te cieszą się dużą frekwencją. Tematyka warsztatów dostosowuje się do bieżących potrzeb. Dlatego warsztaty składają się zwykle z części czysto wykładowej, zajmującej czwartek, piątek i sobotę do obiadu, oraz części warsztatowej, po obiedzie w sobotę. Część warsztatowa zaplanowana jest dla tych uczestników, którzy mieszkają dość blisko albo mają pociągi w godzinach późniejszych. Wykłady w tej części są dłuższe, zwykle 40-minutowe, dotyczą bezpośrednio aktualnej tematyki i są bezpośrednio połączone z dyskusją.

Do tradycji należy przedstawienie na otwarciu podsumowania warsztatów poprzedniego roku i zaproszenie na nie w następnym roku. Część merytoryczną poprzedza wykład inauguracyjny o bardziej ogólnym charakterze, przedstawiający jakieś szczególne osiągnięcia konstrukcyjno-technologiczne albo szczególne ciekawostki techniczne.

Integralną częścią warsztatów są stoiska wystawców: firm produkcyjnych i wykonawczych (zwykle kilkadziesiąt), a także stoisk (zwykle kilka) firm oferujących programy komputerowe. W zasadzie przewiduje się w ramach sesji wykładowej jeden wykład promocyjny merytoryczny, choć różnie to było. Ograniczenie liczby wykładów promocyjnych ma na celu utrzymanie proporcji zwartości cyklu szkoleniowego, gdzie wystąpienie promocyjne powinno ubarwiać ciąg wykładów, a nie na odwrót.

Po południu, równoległe do dyskusji nad wykładami i po niej, mają też miejsce specjalne spotkania wystawców z projektantami organizowane w salach dodatkowych i plenarnej. Niektóre z nich, skierowane są do tych uczestników, którzy przyjechali wcześniej, odbywają się w środę przed oficjalnym otwarciem warsztatów.

Oficjalne otwarcie warsztatów ma miejsce w czwartek rano, ale już w środę wieczorem organizowane jest spotkanie koleżeńskie powitalne, zwykle z poczęstunkiem i muzyką (występem znanych artystów scen polskich). Późny wieczór czwartkowy poświęcony jest zwykle dyskusjom nad zawodem inżyniera, prawem budowlanym i innymi zagadnieniami aktualnymi dla środowiska, najczęściej z udziałem przedstawicieli władz. Dyskusjom tym, trwającym do późnych godzin, często towarzyszą intensywne emocje. Piątkowy wieczór to zwykle przerwa dla ducha – występy artystyczne i bankiet sponsorowany przez wystawców.

Przez minione dwanaście lat formuła warsztatów była w zasadzie stała, jednak zmieniała się ich lokalizacja. W latach 1998–2001 warsztaty odbywały się głównie w sali kinowej w Zakładzie Przyrodolecznym Sanatorium „Równica” w Ustroniu, a uczestnicy mieszkali w „piramidach”. W latach 2002–2004

warsztaty gościły w „Orlim Gnieździe” w Szczyrku, a w 2005 roku zostały zorganizowane w hotelu „Gołębiwski” w Wiśle. W następnych latach Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji odbywały się w Wiśle lub Szczyrku zatem uzasadnione jest stosowanie nazwy lokalizacji warsztatów: Beskidy.

Rok	Główny organizator	Miejsce obrad	Liczba uczestników
1986/I	Kraków	Kraków	312
1987/II	Kraków	Kraków	342
1988/III	Gliwice	Katowice	393
1989/IV	Katowice	Katowice	298
1990/V	Kraków	Kraków	156
1991/VI	Gliwice	Ustroń	126
1992/VII	Katowice	Ustroń	90
1993/VIII	Kraków	Ustroń	120
1994/IX	Gliwice	Ustroń	145
1995/X	Bielsko-Biała	Cieszyn-Ustroń	250
1996/XI	Katowice	Ustroń	208
1997/XII	Kraków	Ustroń	280
1998/XIII	Gliwice	Ustroń	408
1999/XIV	Bielsko-Biała	Ustroń	375
2000/XV	Katowice	Ustroń	446
2001/XVI	Kraków	Ustroń	468
2002/XVII	Gliwice	Ustroń	458
2003/XVIII	Bielsko-Biała	Ustroń	420
2004/XIX	Katowice	Ustroń	448
2005/XX	Kraków	Wisła	475
2006/XXI	Gliwice	Szczyrk	542
2007/XXII	Bielsko-Biała	Szczyrk	510
2008/XXIII	Katowice	Szczyrk	595
2009/XXIV	Kraków	Wisła	538
2010/XXV	Gliwice	Szczyrk	595
2011/XXVI	Bielsko-Biała	Szczyrk	500
2012/XXVII	Katowice	Szczyrk	540
2013/XXVIII	Kraków	Wisła	475
2014/XXIX	Gliwice	Szczyrk	511
2015/XXX	Bielsko-Biała	Szczyrk	497
2016/XXXI	Katowice	Szczyrk	506
2017/XXXII	Kraków	Wisła	517
2018/XXXIII	Gliwice	Szczyrk	618
2019/XXXIV	Bielsko-Biała	Szczyrk	400
2020/XXXV	Katowice	Wisła	400
2021	konferencja się nie odbyła ze względu na pandemię		
2022/XXXVI	Kraków	Wisła	360
2023/XXXVII	Gliwice	Wisła	378
2024/XXXVIII	Bielsko-Biała	Wisła	300
2025/XXXIX	Katowice	Wisła	392

Wszystko zaczęło się w 1985 roku uchwałą Zarządu Oddziału PZITB w Krakowie o powołaniu Komitetu Organizacyjnego Konferencji Technicznej pod tytułem Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, przy współpracy z Oddziałami PZITB w Gliwicach i Katowicach.

• **I WPPK-1986.** Odbyły się w lutym w krakowskiej „Rotundzie”, lokalu studenckim przy ul. Oleandry 1. Uczestnicy zakwaterowani zostali w hotelach, wyżywienie organizowali we własnym zakresie. Organizatorzy niepokoił się, jak uczestnicy odbiorą problem jakości oraz dostępności norm budowlanych przez projektantów. Pierwszy zamówiony referat wygłosił dyrektor Polskiego Komitetu Normalizacyjnego. Ale następne referaty uporządkowały problematykę. Konferencja zakończyła się opracowaniem wniosków, które wysłano za pośrednictwem Zarządu Głównego PZITB do PKN. Udostępniono projektantom stoiska (około 10), na których mogli prezentować swoje osiągnięcia zawodowe i dyskutować nad przyjętymi w nich rozwiązaniami. Na jednym ze stoisk wystawiono komputer PC-AT z kolorowym monitorem, prezentujący jakiś program użytkowy. W czasie przerwy uczestnicy poszli zobaczyć komputer. Przy pozostałych stoiskach pustki. Organizatorzy mieli trudności z rozpoczęciem kolejnej sesji.

• **II WPPK-1987.** Zgodnie z przyjętym harmonogramem w 1987 roku mieli organizować koledzy z ZO Gliwice oraz Katowice, jednak ze względu na brak doświadczenia oddali pole Krakowowi. Warsztaty odbyły się w auli Akademii Wychowania Fizycznego w Krakowie. Po raz pierwszy ukazało się logo konferencji – projektant przy rajzbracie. Organizatorzy, zachęcenii zainteresowaniem projektantów nowym instrumentem w pracy – komputerem, zaproponowali biuram projektów zaprezentowanie swoich programów wspomagających pracę projektową. Przyjechało około 10 biur z komputerami i utworzono giełdę (wymianę) prezentowanych programów użytkowych. Po raz pierwszy zastosowano komputerową rejestrację uczestników. Głównym tematem była odpowiedzialność projektanta za ewentualne pomyłki wynikające z błędów komputerowego programu użytkowego. Długa dyskusja unaoczniała zebranych, że to zawsze projektant odpowiada za swoje dzieło, w tym: za przyjęte rozwiązanie konstrukcyjne, schemat statyczny oraz przyjęte obciążenia technologiczne. Komputer zaś jest jedynie maszyną ułatwiającą pracę. Ponownie uczestnicy nocowali w hotelach rozrzuconych w różnych miejscach Krakowa.

• **III WPPK-1988.** Zachęcenii uzyskaniem doświadczeniem koledzy z Gliwic podjęli się organizacji. Z powodu bardzo dużego zainteresowania (398 uczestników) oraz braku odpowiedniego hotelowego zaplecza w Gliwicach obrady odbyły się w Katowicach przy ul. Wita Stwosza 31 (obecnie Prokuratura Okręgowa). Jak wcześniej, uczestników zakwaterowano w kilku hotelach, dojeżdżano tramwajami, a wyżywienie organizowano we własnym zakresie. Po raz pierwszy ukazało się stoisko z książkami technicznymi. Organizatorzy we współpracy z „Arkadami” zapewnili dostawę najciekawszych tytułów. Przy ogólnym kryzysie, także książki technicznej, księgarnia kilkakrotnie dowoziła je furgonetką, uzyskując w dwa dni obrót całego miesiąca. Przyjechały również komputery, dla których trzeba było zabezpieczyć nocą milicyjną ochronę.

• **IV WPPK-1989.** ZO Katowice było organizatorem kolejnej – jak poprzednio w Katowicach, konferencję przygotowano przy ul. Wita Stwosza 31. Niestety zaczął się proces likwidacji dużych biur projektów, co przełożyło się na liczbę uczestników – tylko 298 osób. Tematem wiodącym była odpowiedzialność zawodowa projektanta w świetle Prawa budowlanego, cywilnego oraz karnego. Temat, w tamtym czasie aktualny i ciekawie przedstawiony, bardzo zainteresował uczestników. Jak poprzednio sukces odnotowała księgarnia „Dom Książki” z Chorzowa.

• **V WPPK-1990.** Warsztaty odbyły się w Krakowie. Założenia organizacyjne jak poprzednio, czyli: noclegi w hotelach, mały poczęstunek w przerwie, zajęcia popołudniowe wg własnego uznania. Obrady odbywały się w Wyższej Szkole Pedagogicznej. Z powodu postępującego rozpadu biur projektów pojawiło się tylko 156 uczestników. Organizatorzy, chcąc ratować kilkuletnią już popularność warsztatów, próbowali uatrakcyjnić program pobytu uczestników, np. zorganizowano wówczas możliwość zakupu sprzętu, wyposażenia stanowiska pracy, narzędzi kreślarskich (dziś już nieznanych, jak nieznany jest zawód kreślarza w zespole projektowym), materiałów piśmiennych, czasem nawet (!) z importu. Pomysł ten „chwycił” wobec drastycznych wówczas braków w handlu takich artykułów. Dobrze zorganizowana sprzedaż książek technicznych funkcjonowała świetnie.

• **VI WPPK-1991.** Zmiana przepisów o zasadach rozliczeń delegacji umożliwiła organizowanie tego typu konferencji, np. w ośrodkach wczasowych i dlatego koledzy z ZO Gliwice zaproponowali przeniesienie konferencji do Ustronia w DW „Maciejka”. Zakwaterowanie w miejscu obrad umożliwiło wydłużenie ich o zajęcia towarzyszące. Powstały pierwsze stoiska firm komputerowych specjalizujących się w produkcji programów użytkowych i one wiązały grupy zainteresowanych uczestników na długie godziny kameralnych rozmów, dyskusji, tłumaczeń – przed ekranem – zawłóści nowych programów obliczeniowych. Dla tworzącej się grupy pasjonatów komputerów był to bardzo istotny element programu warsztatów. Nastąpił dalszy spadek frekwencji, tylko 126 uczestników.

• **VII WPPK-1992.** Ustroń okazał się wspaniałym miejscem do organizacji tego typu imprez technicznych. Koledzy z Katowic przygotowali tam kolejną konferencję. Przesilenie procesu restrukturyzacji biur projektowych sprawiło, że do ostatniej chwili nie było wiadomo, czy koszty organizacji znajdą pokrycie we wpływach. Zgłosiło się tylko 90 uczestników. Prezentacja stoisk komputerowych również była skromna.

• **VIII WPPK-1993.** Organizatorem kolejnych warsztatów został ZO Kraków. W kraju w miejsce dużych biur projektów powstawały jak grzyby po deszczu jedno lub kilkuosobowe zespoły autorskie. Projektanci-konstruktorzy zaczęli w ramach własnej działalności gospodarczej rozszerzać ofertę projektową o projektowanie architektoniczne oraz usługi inwestorskie. Zostali oni odcięci od zorganizowanych w biurach projektów bibliotek technicznych, literatury technicznej oraz nowinek materiałowych. W związku z tymi

okolicznościami zwiększyło się zainteresowanie projektantów warsztatami, liczba uczestników wzrosła do 120 osób. Obrady odbywały się w sali widowiskowej pobliskiego Szpitala Rehabilitacyjnego przy ul. Szpitalnej w Ustroniu, natomiast zakwaterowanie oraz dyskusja nad projektem ustawy Prawo budowlane, w DW „Maciejka”. Firmy tworzące programy wspomagające pracę projektanta już na stałe zagościły na warsztatach, zauważając możliwość szerszego kontaktu ich produktu z użytkownikami.

• **IX WPPK-1994.** Ustroń na dobre wpisał się w kalendarz konferencji. Projektanci działający w rozrzuconych po całej Polsce małych jednostkach projektowych coraz bardziej zaczęli przekonywać się, że obecność na warsztatach daje im wymierne korzyści. Docenili możliwość kontaktu w środowisku oraz wymiany doświadczeń w nowej sytuacji ekonomicznej kraju. Zgłosiło się 145 uczestników i organizatorzy ZO Gliwice z trudem zapewnili im w miarę godziwe warunki wysłuchania referatów w Szpitalu Rehabilitacyjnym. Pozostałe elementy organizacji bez zmian – DW „Maciejka” pękała w szwach. Do późnych godzin nocnych toczono dyskusje ze współautorem ustawy Prawo budowlane dr. inż. Stanisławem Zieleniewskim.

• **Jubileuszowe X WPPK-1995.** Komitet Organizacyjny zaprosił do współpracy kolegów z Bielska-Białej, którzy podjęli się organizacji. Ponownie wzrosło zainteresowanie konferencją – zgłosiło się 250 uczestników. W Ustroniu brakowało sali o odpowiedniej wielkości. Zapadła decyzja o organizacji obrad w auli filii Uniwersytetu Śląskiego w Cieszynie przy założeniu, że uczestnicy będą zakwaterowani w dwóch piramidach „Tulipan” oraz „Magnolia” w Ustroniu i przewożeni autokarami do Cieszyna. W Cieszynie przestronne zaplecze w budynku zamiejscowego Uniwersytetu Śląskiego pozwoliło na wzbogacenie imprezy o stoiska firm prezentujących nowości technologiczne w budownictwie.

• **XI WPPK-1996.** Warsztaty przygotowali koledzy z Katowic. Obrady przeniesiono do będącego w budowie Centrum Leczniczo-Zabiegowego w Ustroniu. Byliśmy pierwszymi użytkownikami sali kinowej o max. pojemności 190 miejsc. Po raz pierwszy trzeba było ograniczyć liczbę uczestników do 208 osób. Drugim mankamentem była konieczność pokonania około 1 kilometra dziennie, przechodząc dwa razy (rano i po południu) z DW „Ziemowit”, „Tulipan” i „Magnolia” na salę obrad.

• **XII WPPK-1997.** Organizatorem byli koledzy z Krakowa. Dzięki postępowi budowy Centrum Leczniczo-Zabiegowego możliwe stało się wykorzystanie sąsiadujących sal i ulokowanie 280 osób. Zauważono, że uczestnicy oczekują dalszej rozbudowy programu warsztatów.

• **XIII WPPK-1998.** Po długiej dyskusji w gronie Komitetu Organizacyjnego, z inicjatywy prof. Włodzimierza Starosolskiego oraz Zbigniewa Dzierżewicza zapadła decyzja o wdrożeniu od 1998 roku nowej formuły konferencji polegającej na: publikowaniu w materiałach konferencyjnych zamówionych referatów/wykładów, zwiększeniu liczby dni

obrad (od popołudnia w środę do obiadu w sobotę) oraz zwiększeniu liczby stoisk wystawców. Ponadto przyjęto zasadę wydawania uczestnikom świadectwa odbycia szkolenia zawodowego. Efektem było lawinowe zainteresowanie warsztatami. Świadectwo ukończenia szkolenia zawodowego jest przydatne w firmach starających się o ISO9000. Rozpoczął się czteroletni cykl „Naprawy i wzmocnienia konstrukcji”. Na początek poświęcony konstrukcjom betonowym i żelbetowym. Organizator ZO Gliwice zanotował 408 uczestników. W 2 tomach stanowiących początek biblioteczki projektanta opublikowano 22 wykłady oraz 37 artykułów reklamowych. Na korytarzach oraz sali gimnastycznej 37 stoisk prezentujących nowinki technologiczne związane z tematem wiodącym – betonem. W hotelach do późnych godzin nocnych trwały dyskusje panelowe. Firmy tworzące programy wspomagające pracę projektanta już na stałe zagościły na warsztatach, zauważając możliwość szerszego kontaktu ich produktu z bezpośrednimi użytkownikami, ceniąc sobie tę możliwość i jej skuteczność.

• **XIV WPPK-1999.** Organizatorem było PZITB Bielsko-Biała poświęcone zostały naprawom i wzmocnieniom konstrukcji murów, stropów i innych elementów wchodzącym w zakres budownictwa ogólnego. Maksymalnie wykorzystane zaplecze i sala kinowa stanowiły nową barierę dla liczby uczestników. Zgłosiło się prawie 400 osób. W trzech tomach opublikowano 29 wykładów oraz 27 artykułów reklamowych.

• **XV WPPK-2000.** Zorganizowały Katowice. Obrady dotyczyły napraw i wzmocnień konstrukcji metalowych i drewnianych. Od uczestników wpłynęło 446 zgłoszeń, co stworzyło potrzebę zorganizowania dodatkowej sali w kawiarni na parterze. Łączność z salami panelowymi oraz kawiarnią zapewniła transmisja obrad na telewizorach, łączność za pomocą kabli. Materiały opublikowano w pięciu tomach. Obrady trwały od rana do późnych godzin wieczornych.

• **XVI WPPK-2001.** Poświęcono naprawom i wzmocnieniom konstrukcji fundamentowych i „wszystko co w ziemi”. Organizacji podjęli się koledzy z Krakowa. Program merytoryczny Warsztatów przygotował Edward Motak, już wówczas ciężko chory, zmarł krótko przed rozpoczęciem spotkania w Ustroniu. Pozostawił obszerne archiwum warsztatów z poprzednich konferencji. Uczestniczyło 468 projektantów, wystawców i wykładawców. Materiały konferencyjne opublikowano w trzech tomach zawierających w sumie 31 referatów oraz 30 informacji promocyjno-handlowych. Zostały wykorzystane maksymalne możliwości organizacyjne zapewniające odpowiedni komfort uczestnikom.

Ta konferencja zakończyła pierwszy, czteroletni cykl szkoleniowy. Jego popularność oraz bardzo dobre rezultaty nakłoniły Komitet Organizacyjny warsztatów do kontynuowania, w tym samym stylu kolejnych spotkań warsztatowych.

• **XVII WPPK-2002.** Po wyczerpaniu poprzedniego cyklu rozpoczęto kolejny, również czteroletni, poświęcony „Nowym rozwiązaniom konstrukcyjno-materiałowo-technologicznym”, a konkretnie konstrukcjom żelbetowym. Koledzy

z Gliwic, organizatorzy, przenieśli noclegi do hoteli bliżej sali obrad w DW: „Wilga”, „Kos”, „Narcyz” i „Elektron”. W 2002 roku wprowadzono częściową komercjalizację konferencji, jednak założono odpowiednie proporcje pomiędzy wykładami i referatami komercyjnymi. Należy podkreślić, że z roku na rok referaty komercyjne są coraz lepszej jakości. W konferencji wzięło udział 458 uczestników, którzy mieszkali w czterech hotelach blisko sal obrad. Pozwoliło to na organizację programu nawet do późnych godzin. Wysłuchano 30 wykładów oraz 27 komunikatów techniczno-promocyjnych, które następnie opublikowano w czterech tomach. Pojawiły się materiały konferencyjne na płytach CD.

• **XVIII WPPK-2003.** Poświęcone budownictwu ogólnemu organizowali koledzy O/Bielsko-Biała. Formuła organizacyjna nie uległa zmianie. Uczestniczyło 420 osób. Wysłuchano 33 wykładów oraz 11 komunikatów techniczno-promocyjnych. Materiały konferencyjne opublikowano w czterech tomach.

• **XIX WPPK-2004.** Organizowane były przez O/Katowice. Formuła pozostała taka sama. Liczba uczestników wzrosła do 448 osób. Stoiska komputerowe ulokowano w innym hotelu, co spowodowało niemałe zamieszanie. Wydano w czterech tomach 32 wykłady i 22 komunikaty techniczno-promocyjne. Po raz pierwszy stoiska prezentowało 42 wystawców.

• **Jubileuszowe XX WPPK-2005.** Atrakcyjność warsztatów zmusiła organizatorów do znalezienia nowego miejsca obrad. Koledzy z Krakowa po 14 latach pobytu w Ustroniu przenieśli konferencję do Wisły, do Hotelu „Gołębiowski” nadając warsztatom zupełnie inny wymiar. Warunki hotelowe idealne, wysoki standard. Pełna sala – 474 uczestników. W programie 26 wykładów oraz 14 informacji techniczno-handlowych. Problematyka zgodna z podziałem przyjętym w programie tego cyklu szkoleniowego obejmującego: fundamentowanie, ścianki szczelne i szczelinowe, kotwy gruntowe i konstrukcje z gruntu zbrojonego, czyli, jak zawsze: „wszystko co pod ziemią”. Bardzo duże zainteresowanie uczestników utwierdziło organizatorów w przekonaniu, że należy kontynuować tę coroczną imprezę, nie ograniczając jej wielkości. Zbyt duże koszty pobytu w luksusowym hotelu zmusiły do ponownego przeanalizowania organizacji następnych spotkań.

• **XXI WPPK-2006.** W 2006 r. konferencję przeniesiono do Szczyrku, do Centrum Kongresowo-Rekreacyjnego „Orle Gniazdo”, zapewniając zakwaterowanie ponad 500 uczestnikom. W projektowaniu i wykonawstwie nastąpiła pokoleniowa wymiana kadry oraz technologiczny postęp techniczny w budownictwie. Z tego powodu powrócono do cyklu pt: „Naprawy i wzmocnienia konstrukcji”. Warsztaty zorganizował Gliwicki Oddział PZITB, a wiodącą tematyką warsztatów były konstrukcje betonowe i żelbetowe. Idealne warunki organizacji – kolejny rekord 542 uczestników. W programie 32 wykłady oraz 15 informacji techniczno-handlowych, ponadto koledzy z Gliwic zapewnili uczestnikom „ucztę duchową” – koncert chóru Politechniki Śląskiej oraz występ artystów Teatru „Rozrywki” z Chorzowa.



WPPK 2004



WPPK 2005



WPPK 2007



WPPK 2008



WPPK 2010



WPPK 2012



WPPK 2014



WPPK 2016

• **XXII WPPK-2007.** Organizatorami byli koledzy z Bielska Białej. Głównym tematem warsztatów w Szczyrku były „Naprawy i wzmocnienia konstrukcji wchodzących w zakres budownictwa ogólnego”, w tym tarasy, balkony itp. Było 532 uczestników. W programie – 27 wykładów oraz 20 informacji techniczno-handlowych. W godzinach wieczornych toczyła się ożywiona dyskusja nad obecnym stanem Prawa budowlanego i projektem kolejnej nowelizacji. Wysłuchano recitalu słowno-muzycznego w wykonaniu artystów Teatru Polskiego z Bielska-Białej i występu regionalnego zespołu góralskiego.

• **XXIII WPPK-2008.** Komitet Organizacyjny Katowickiego PZITB wybrał Szczyrk. W logo warsztatów w miejsce Ustroń pojawiły się Beskidy. Tematem wiodącym były „Naprawy i wzmocnienia konstrukcji metalowych, posadzek przemysłowych, lekkiej obudowy oraz nowość – rusztowania”. Tym razem organizatorzy zostali zaskoczeni frekwencją. Po raz pierwszy liczba zgłoszeń przekroczyła techniczne możliwości przyjęcia wszystkich chętnych. Przybyło 595 uczestników, którzy zostali zakwaterowani w hotelu „Orle Gniazdo” i „Panorama” oraz pensjonatach „Stare Orle Gniazdo” i „Stokrotka”. Zebrani wysłuchali 31 wykładów problemowych, 8 wykładów technicznych firm specjalistycznych oraz 16 prezentacji techniczno-promocyjnych firm specjalistycznych. Łącznie warsztaty zajęły prawie 25 godzin. Warsztatom towarzyszyły imprezy artystyczno-integracyjne. Wysłuchano recitalu Aloszy Awdiejewa. Tradycyjnie w czwartek odbyła się dyskusja z udziałem podsekretarza stanu Ministerstwa Infrastruktury Olgierda Dziekońskiego oraz głównego inspektora nadzoru budowlanego Roberta Dziwińskiego na temat aktualnego stanu i przyszłości przepisów związanych z procesem budowlanym. W środę odbyło się spotkanie z samorządem zawodowym inżynierów budownictwa, któremu przewodniczył prof. Zbigniew Grabowski (PIIB).

• **XXIV WPPK-2009.** Nastąpiła kolejna zmiana lokalizacji. Pogarszające się warunki hotelowe w „Orlim Gnieździe” skłoniły organizatorów – Oddział w Krakowie – do organizacji warsztatów w Wiśle, tym razem w Hotelu „Stok”. Za Komitet Organizacyjny odpowiadał Mirosław Boryczko. Zainteresowanie jak zwykle ogromne, zgłosiło się 538 uczestników. Dobiegł końca cykl „Naprawy i wzmocnienia konstrukcji” – poświęcone fundamentom, wzmocnieniu podłoża gruntowego, ścian szczelinowych itp. Aktywny udział w konferencji zapewniło Stowarzyszenie Geotechników. Wysłuchano 34 wykłady problemowe, 12 wykładów technicznych oraz 2 wykłady z dyskusją panelową. Zorganizowano 40 stoisk prezentujących nowoczesne technologie wykorzystywane w budownictwie związane z głównym tematem Warsztatów – geotechniką. Warsztaty te zakończyły cykl „Naprawy i remonty konstrukcji”. Wydawnictwo konferencyjne wydano w 3 tomach na 1248 stronach. Warunki pobytu uczestników w tym hotelu były wysmienite. Pozostał jedynie problem znacznych odległości sali obrad do stoisk wystawców zawsze towarzyszących konferencji. Aby zachęcić uczestników

do zwiedzenia stoisk organizatorzy wpadli na oryginalny pomysł sprawdzenia ich aktywności w tym względzie premii w ciekawymi rzeczowymi nagrodami. Ucztę duchową zapewnił Andrzej Sikorowski z zespołem „Pod Budą”.

• **Jubileuszowe XXV WPPK-2010.** Wraz z powtórzeniem cyklu tematycznego „Nowoczesne rozwiązania konstrukcyjno-materiałowo-technologiczne” Gliwicki Oddział PZITB, jako główny organizator powrócił do „Orlego Gniazda” w Szczyrku i Hotelu „Meta”. Jak przystało na jubileusz, organizator zapewnił wiele ciekawych atrakcji. Nie obyło się bez fajerwerków, występu Narodowego Zespołu Pieśni i Tańca „Śląsk” im. S. Hadyny oraz występu duetu akordeonowego, iluzjonisty i big bandu „Why not Konopiska”. Wysłuchano 33 wykłady problemowe, 9 wykładów technicznych, 15 prezentacji techniczno-promocyjnych. Łącznie wykłady i prezentacje zajęły 23 godziny. Materiały konferencyjne zostały wydane w 4 tomach, na 1800 stronach. Udział w Warsztatach wzięło 576 uczestników. Komitet Organizacyjny nadał tytuły „Sponsorów 25-lecia WPPK” czterem firmom, które wniosły najbardziej okazały wkład merytoryczny i pomagający sprawie WPPK. Tytuł ten otrzymały (w kolejności alfabetycznej) firmy: CONSOLIS, CPJS, KOELNER i PERI.

• **XXVI WPPK-2011.** Organizatorem był Oddział PZITB w Bielsku-Białej, w ramach rozpoczętego w poprzednim roku cyklu główną tematyką było budownictwo ogólne. Wysłuchano 30 wykładów problemowych, 10 wykładów technicznych, 10 prezentacji techniczno-promocyjnych. Zorganizowano 52 stoiska wystawiennicze. Materiały konferencyjne zostały wydane w 3 tomach, na 1247 stronach. W ramach części artystycznej aktorzy Teatru Polskiego z Bielska zaprezentowali koncert starych przebojów w wersji parodii dawnych wykonawców,

• **XXVII WPPK-2012.** Głównym organizatorem kolejnych warsztatów był Oddział PZITB w Katowicach. Kontynuując 4-letni cykl wiodącym tematem były konstrukcje metalowe. Postanowiono kompleksowo przedstawić pakiet 39 norm zawartych w Eurokodzie 7 – Konstrukcje metalowe. Wygłoszono 33 wykłady obejmujące powyższą tematykę. Ponadto wygłoszono 20 wykładów techniczno-promocyjnych oraz zorganizowano 48 stoisk prezentujących technologie i materiały budowlane głównie związanych z tematem Warsztatów. W Warsztatach uczestniczyło 540 projektantów i wykonawców. Atrakcją czwartkowego wieczoru była czterogodzinna prezentacja szczegółów projektowania i realizacji nowoczesnych stadionów w Gdańsku, Poznaniu, Warszawie oraz Wrocławiu przygotowywanych na Euro-2012. W piątkowy wieczór odbył się występ Krzysztofa Daukszewicza. Na zakończenie konferencji Katowicki Oddział przekazał sztafetę kolegom organizatorom przyszłorocznych warsztatów Małopolskiemu Oddziałowi PZITB.

• **XXVIII WPPK-2013.** W kolejnym roku Małopolski Oddział przygotował Warsztaty jak zwykle przenosząc konferencję do Wisły, do Hotelu „Stok”. Wiodący temat związany geotechniką przygotował prof. Lech Wysokiński – wybitny znawca

problemu. W ten sposób zakończono cykl „Nowoczesne rozwiązania konstrukcyjno-materiałowo-technologiczne”. Wygłoszono 34 wykłady problemowe, 7 wykładów technicznych 20 prezentacji promocyjnych firm specjalistycznych. Materiały konferencyjne zawarto w dwóch tomach na 900 stronach. Zorganizowano 45 stoisk prezentujących technologie i materiały budowlane głównie związanych z tematem Warsztatów. W Warsztatach uczestniczyło 540 projektantów i wykonawców. W ramach towarzyszących imprez uczestnicy wysłuchali koncertu Budki Suflera z Krzysztofem Cugowskim oraz recitalu Edyty Geppert.

- **XXIX WPPK-2014.** Warsztaty ponownie wróciły do Szczyrku. Prawie 30 lat konferencja techniczna WPPK cieszy się niesłabnącym powodzeniem wśród projektantów konstrukcji obiektów budowlanych. Konferencja ta o formule warsztatów szkoleniowych od lat pomaga w rozwiązywaniu problemów związanych z projektowaniem. Tym razem uczestnicy zostali zakwaterowani w hotelach „Orle Gniazdo” oraz „Meta”. Po raz kolejny w wyniku dyskusji całego komitetu organizacyjnego postanowiono powrócić do czteroletniego cyklu „Naprawy i wzmocnienia konstrukcji budowlanych”. Zgodnie z przyjętym podziałem wiodącej problematyki warsztatów Gliwicki Oddział przygotował 29 wykładów problemowych poświęconych konstrukcjom żelbetowym. Ponadto wysłuchano 7 wykładów technicznych oraz 10 prezentacji techniczno-promocyjnych. Łącznie ww. zajęcia odbyły się w czasie 19 godzin. Materiały konferencyjne zostały wydane w czterech tomach na 1750 stronach. W tej tradycyjnej już imprezie technicznej uczestniczyło 511 osób oraz 53 firmy specjalistyczne. W ramach towarzyszących imprez uczestnicy wysłuchali koncertu Akademickiego Zespołu Muzycznego Politechniki Śląskiej, Żeńskiej Orkiestry Salonowej Katowickiego Holdingu Węglowego pod dyktando maestro Grzegorza Mierzwińskiego oraz Zespołu folkowego „Lemko Tower”.

- **Jubileuszowe XXX WPPK-2015.** Zgodnie z przyjętą zasadą rotacji organizacji warsztatów w 2015 roku głównym organizatorem konferencji był Oddział PZITB w Bielsku-Białej, tradycyjnie przy współpracy pozostałych oddziałów. Jubileuszowe XXX Warsztaty odbyły się w „Orlim Gnieździe” w Szczyrku. Zgodnie z przyjętą zasadą programową była to kontynuacja cyklu „Naprawy i wzmocnienia konstrukcji budowlanych”, w tym: konstrukcji stropów, murów, schodów oraz pozostałych elementów obejmująca problematykę budownictwa ogólnego. Organizatorzy przygotowali 31 wykładów problemowych poświęconych problemom budownictwa ogólnego, 15 wykładów technicznych oraz 8 prezentacji technicznych. W Warsztatach uczestniczyło 497 osób. Materiały konferencyjne zostały wydane w trzech tomach obejmujących 1442 strony. W ramach warsztatów zorganizowano salon wystawienniczy, w którym 45 firm zaprezentowało nowoczesne technologie i wyroby budowlane. Warsztatom nadano stosowną oprawę związaną z jubileuszem, a uświetniły je występy artystyczne. Podczas otwarcia wystąpił duet

koncertowy NOVA (gitary), w drugim dniu konferencji z recitalem wystąpili Iwona Loranc i Robert Talarczyk. Wieczór jubileuszowy poświęcono historii warsztatów, przy muzyce zespołu Crazy Band. Przed rozpoczęciem tego wieczoru odśpiewano wspólnie piosenkę 30 lat minęło (muzyka z serialu „Czterdziestolatek”, słowa okolicznościowe prof. Krzysztof Stypuła z Politechniki Krakowskiej).

- **XXXI WPPK-2016.** Odbyły się w Szczyrku. Głównym organizatorem był Katowicki Oddział PZITB, przy współpracy zaprzyjaźnionych Oddziałów PZITB w Bielsku-Białej; Gliwiczach oraz Krakowie. W kontynuowanym czteroletnim cyklu „Naprawy i wzmocnienia konstrukcji budowlanych”, wiodącym tematem warsztatów były: konstrukcje metalowe, posadzki przemysłowe, lekka obudowa oraz rusztowania. Mając na uwadze merytoryczną treść konferencji, organizatorzy postanowili przedstawić uczestnikom najnowsze metody oraz technologie wzmocnienia i napraw konstrukcji. Koordynację treści merytorycznej powierzono dr. inż. Radosławowi Jasińskiemu, który pod kierunkiem prof. Włodzimierza Starosolskiego przygotował materiały konferencyjne, zawierające 32 wykłady opracowane przez cenionych pracowników nauki. Zostały one opublikowane w trzech tomach, tworząc wręcz podręcznikową biblioteczkę przydatną w pracy projektanta. Ponadto w czwartym tomie umieszczono referaty i informacje techniczno-promocyjne. Całość obejmuje 1830 stron druku.

Jako drugą formę szkolenia należy uznać towarzyszące warsztatom stoiska wystawiennicze firm prezentujących najnowsze rozwiązania materiałowe i technologiczne. Zorganizowano 51 stoisk, w tym 8 stoisk z programami komputerowymi użytecznymi w pracy projektanta. Ponadto jeden ze sponsorów generalnych – Polskie Towarzystwo Cynkowicze – zorganizował szkoleniową wycieczkę autokarową do Zakładów Cynkowiczych w Chrzanowie.

Tradycyjnie organizatorzy zapewnili uczestnikom ucztę duchową. W trakcie wieczoru refleksji zebrani wysłuchali wierszy Stanisława Krzyżaniaka, odczytanych przez aktora Teatru Śląskiego Jerzego Kuczerę przy akompaniamencie kwartetu smyczkowego z Filharmonii Śląskiej, natomiast w ostatni wieczór mogli podziwiać występ akordeonisty Marcina Wyrostka wraz z zespołem.

Przez warsztaty przewinęło się łącznie 506 uczestników z całej Polski. Mają one charakter specjalistycznego szkolenia zawodowego o wymienionej wyżej tematyce. Zgodnie z normą PN-ISO-9000 spełniają wymogi określone przepisami o systemach zapewnienia jakości oraz zarządzania jakością w przedsiębiorstwach budowlanych i projektowych. Każdy uczestnik otrzymał zaświadczenie o wysłuchaniu prawie 11 godzin wykładów problemowych oraz 10 godz. prezentacji techniczno-promocyjnych firm specjalistycznych.

- **XXXII WPPK-2017.** Organizatorami warsztatów był Małopolski Oddział PZITB w Krakowie. Jak zwykle konferencja odbyła się w Wiśle, w Hotelu Stok. Tematem wiodącym była problematyka geotechniki w budownictwie. Wysłuchano 36

wykładów dotyczących aktów normatywnych w geotechnice, badań geotechnicznych w praktyce inżynierskiej, krajowych wytycznych projektowania i wykonawstwa robót geotechnicznych, wybranych zagadnień konstrukcji palowych oraz wzmacniania gruntów. Wykłady zostały umieszczone w dwutomowym wydawnictwie. Warsztatom towarzyszyły stoiska wystawiennicze prezentujące najnowsze trendy w projektowaniu oraz realizacji konstrukcji zagłębionych w gruncie. Naukowy nadzór nad programem zapewnili profesorowie Politechniki Krakowskiej Janusz Kawecki oraz Krzysztof Stypuła. Przewodniczącym Komitetu Organizacyjnego był Mirosław Boryczko. Wieczory kończyły się występami artystów scen polskich.

- **XXXIII WPPK-2018.** Warsztaty odbywały w Centrum Kongresów i Rekreacji „Orle Gniazdo” w Szczyrku. Organizatorem warsztatów był Oddział Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa w Gliwicach, przy współpracy Oddziałów w Bielsku-Białej, Katowicach i Krakowie. Komitetowi Organizacyjnemu WPPK 2018 przewodniczył Łukasz Drobiec, a redakcją merytoryczną warsztatów zajął się Radosław Jasiński. Tradycyjnie WPPK rozpoczynały nowy, czteroletni cykl poświęcony „Innowacyjnym i współczesnym rozwiązaniom w budownictwie”. Wiodącym tematem wykładów były konstrukcje żelbetowe. W warsztatach wzięło udział rekordowe 618 uczestników, a dodatkowo wydano 35 jednodniowych wejściówek. Wśród szacownych gości WPPK 2018 wymienić należy przewodniczącego PZITB Ryszarda Trykosko, przewodniczącego PIIB Andrzeja Rocha Dobruckiego, wiceprzewodniczącego PIIB Stefana Czarnieckiego, przewodniczących Rad Okręgowych Izby Inżynierów Budownictwa Stanisława Karczmarczyka (Małopolskiej OIIB) i Franciszka Buszkę (Śląskiej OIIB). Warsztaty otworzył wykład inauguracyjny prof. Zdzisława Trzaski pt. „Nanonauki i nanotechnologie w budownictwie i architekturze”. W trakcie WPPK, w siedmiu sesjach tematycznych, wygłoszonych zostało 29 wykładów problemowych, przygotowanych przez najlepszych specjalistów wywodzących się z wiodących ośrodków naukowo-badawczych, firm projektowych i wykonawczych. Wykłady zostały opublikowane w formie 3 konferencyjnych tomów o łącznej objętości ponad 1600 stron. Dodatkowo w trakcie warsztatów wygłoszonych zostało 7 interesujących wykładów Merytorycznych Partnerów warsztatów oraz 10 referatów wystawców, dotyczących najnowszych rozwiązań i technologii stosowanych w projektowaniu i wykonawstwie konstrukcji. Warsztatom towarzyszyła ekspozycja 42 firm. W trakcie trzech wieczorów uczestnicy warsztatów mieli okazję wysłuchać duetu Gabrieli i Michała Kubarskich, chóru męskiego Calvi Cantores, podziwiać zespół taneczny Salake i wziąć udział w koncertach zespołów muzycznych Sąsiedzi, Womanhood i Chrzęszcz. Wieczór stropowy uświetnił Aleksander Doba, polski podróżnik i kajakarz, zdobywca tytułu „Podróżnika Roku 2015 National Geographic”.

- **XXXIV WPPK-2019.** Głównym organizatorem WPPK 2019 był Oddział PZITB w Bielsku-Białej, we współpracy z Oddziałami

PZITB z Gliwic, Katowic i Krakowa. Konferencja kontynuowała rozpoczęty w ubiegłym roku cykl „Innowacyjne i współczesne rozwiązania w budownictwie” – w szeroko rozumianym budownictwie ogólnym. Komitetowi Organizacyjnemu przewodniczył Janusz Kozuła, a merytoryczne przygotowanie programu wykładów powierzono dr. hab. inż. Łukaszo wi Drobcowi, profesorowi Politechniki Śląskiej. Jak co roku, przekazano uczestnikom konferencji wydawnictwo zawierające komplet 33 wykładów w trzech tomach. W warsztatach uczestniczyło około 400 osób, projektantów, wykonawców obiektów budowlanych, pracowników naukowych kształcących inżynierów budownictwa i przedstawicieli firm oferujących materiały, technologie budowlane oraz programy komputerowe wspomagające projektowanie. Wśród uczestników byli również zaproszeni goście, m.in. przewodniczący PZITB Ryszard Trykosko, zastępca głównego inspektora nadzoru budowlanego Krzysztof Piątek.

Wykład inauguracyjny nt. „Autorska propozycja nowych wymagań technicznych dotyczących obiektów budowlanych w kontekście katastrofy wiaduktu Polcevera w Genewie” wygłosił prof. Janusz Rymsza. Tradycyjnie warsztatom towarzyszył Salon Wystawców, w którym 48 firm prezentowało na stoiskach wystawienniczych swoje technologie, wyroby budowlane i nowości. Dla uatrakcyjnienia konferencyjnych wieczorów organizatorzy przygotowali spotkanie z Sebastianem Kawą, znanym szybownikiem, oraz koncerty w wykonaniu śląskich artystów.

- **Jubileuszowe XXXV WPPK-2020.** Głównym organizatorem był Oddział PZITB w Katowicach, który w 2020 roku świętował 85 rocznicę powstania, jako Śląsko-Dąbrowski Oddział Polskiego Związku Inżynierów (poprzednika PZITB), przy pomocy Gliwic, Bielska -Białej i Krakowa. Stale pogarszające się warunki części hotelowej w Centrum Kongresów i Rekreacji „Orle Gniazdo” w Szczyrku spowodowało kolejną przeprowadzkę warsztatów na dłużej do Hotelu Stok w Wiśle-Jaworniku. Na zaproszenie organizatorów przybył przewodniczący PZITB Ryszard Trykosko. Konferencja WPPK zgromadziła około 400 uczestników. Biorący udział w warsztatach otrzymali 4-tomowe wydawnictwo, składające się z 3-tomowej monografii zawierającej 31 recenzowanych wykładów i jednego tomu z materiałami konferencyjnymi i informacjami techniczno-promocyjnymi. Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji kontynuowały rozpoczęty w 2018 roku czteroletni cykl „Innowacyjne i współczesne rozwiązania w budownictwie”. Temat przewodni „Konstrukcje metalowe” rozbudowano o zagadnienia dotyczące lekkiej obudowy, posadzek przemysłowych i stalowych rusztowań w zakresie konstrukcji stalowych. Wykład otwierający wygłosił dr. hab. inż. Krzysztof Żółtowski, prof. Politechniki Gdańskiej. Tradycyjnie konferencji towarzyszyły stoiska wystawiennicze, na których swoje produkty prezentowało 46 firm, wśród nich 10 firm komputerowych. Organizatorzy przygotowali również atrakcyjny program „wieczorów



WPPK 2017



WPPK 2018



WPPK 2019



WPPK 2020



WPPK 2022



WPPK 2023



WPPK 2024



WPPK 2025

inżynierskich". W przeddzień otwarcia obrad konferencyjnych odbyło się wieczorne spotkanie z panelem dyskusyjnym na temat „Zmiany w Prawie budowlanym dotyczące przygotowania dokumentacji projektowej dla przewidywanej inwestycji”. Drugiego wieczoru wystąpił kwintet smyczkowy „Wołosi”. Trzeci wieczór wypełniły występy zespołu instrumentalno-wokalnego „Carrantuohill”, prezentującego muzykę irlandzką, i grupy tanecznej „Salake”.

• **Rok 2021** – konferencja się nie odbyła ze względu na pandemię.

• **XXXVI WPPK-2022.** Warsztaty odbywały się w Wiśle. Głównym tematem była geotechnika. Organizatorem edycji warsztatów był Małopolski Oddział PZITB w Krakowie, przy współpracy Oddziałów w Bielsku-Białej, Gliwicach i Katowicach. Za Komitet Organizacyjny odpowiadał Mirosław Boryczko. Z zaproszonych gości pierwsza wystąpiła przewodnicząca PZITB prof. Maria Kaszyńska, podkreślając znaczenie konferencji. Kolejne wystąpienie należało do przewodniczącego Śląskiej Okręgowej Izby Inżynierów Budownictwa Romana Karwowskiego, przewodniczący Komitetu Organizacyjnego WPPK 2020 Andrzej Szydlowski podsumował poprzednią edycję, Radosław Jasiński przewodniczący Komitetu Organizacyjnego WPPK 2023 zaprezentował w zarysie program następnej konferencji. Profesor Michał Topolnicki – koordynator naukowy przedstawił program konferencji. Wykład inauguracyjny „Budowa Kanału Żeglugowego przez Mierzę Wiślaną – wyzwania inżynierskie” wygłosił Ryszard Trykosko – wiceprezes NDI. Wśród zaproszonych gości należy wymienić Dorotę Cabańską – głównego inspektora nadzoru budowlanego oraz Adama Baryłkę dyrektora Departamentu Architektury, Budownictwa i Geodezji w Ministerstwie Rozwoju, Pracy i Technologii. Wiodącym tematem była geotechnika, prezentowano zagadnienia: projekt nowego Eurokodu 7, badania geotechniczne i ich interpretacja, modelowanie numeryczne i weryfikacja, wytyczne projektowania kolumn sztywnych wraz z przykładami, badania i analizy posadowienia, monitorowanie geotechniczne, wzmacnianie i naprawy fundamentów, doświadczenia z realizacji obiektów w formule „Zaprojektuj i zbuduj”. Ogółem w trakcie WPPK'2022, w dziesięciu sesjach tematycznych, wygłoszone zostały 33 wykłady problemowe, przygotowane przez najlepszych specjalistów wywodzących się z wiodących ośrodków naukowo-badawczych, firm projektowych i wykonawczych. Konferencja została przesunięta o ponad dwa lata ze względu na pandemię. Dodatkowo w trakcie warsztatów wygłoszono 11 wykładów firmowych i 4 prezentacje. Wykłady zostały opublikowane w formie 2-tomowego wydawnictwa konferencyjnego o łącznej objętości ponad 700 stron. W Centrum Wystawienniczym Konferencji zaprezentowały się 34 firmy. Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji cieszyły się dużym zainteresowaniem, odwiedziło je ponad 360 uczestników z całego kraju. Organizatorzy zadbali także o rozwój duchowy, wysłuchaliśmy koncertu

„Skaldów, recitalu Jagi Wrońskiej z piosenkami Marka Grechuty i Ewy Demarczyk, występu „Piwnicy pod Baranami” z piosenkami dwudziestolecia międzywojennego „Powróćmy jak za dawnych lat”.

• **XXXVII WPPK-2023.** Warsztaty odbyły się w Hotelu Stok w Wiśle Jaworniku, rozpoczęły nowy czteroletni cykl tematyczny „Naprawy i wzmocnienia konstrukcji” z wiodącym tematem – „Konstrukcje żelbetowe”. Powrócono do zagadnień podejmowanych na warsztatach w 2014 roku, ale w nowym, istotnie rozszerzonym i uwspółcześnionym wydaniu. Organizacji WPPK podjął się Oddział PZITB w Gliwicach przy współpracy Oddziałów w Bielsku, Katowicach i Krakowie. W imprezie uczestniczyło w sposób stacjonarny 378 osób i 50 internautów śledzących obrady w sposób zdalny. Komitetem Organizacyjnym Warsztatów kierował prof. Radosław Jasiński. Gośćmi konferencji byli między innymi przewodniczący Rady Małopolskiej OIIB – Mirosław Boryczko, przewodniczący Rady Śląskiej OIIB – Roman Karwowski oraz wiceprzewodniczący PZITB – Marek Zackiewicz i Wiesław Baran, a także przewodnicząca Sekcji Konstrukcji Betonowych KILiW PAN prof. dr hab. inż. Anna Halicka. Tematyka warsztatów obejmowała zagadnienia: przepisy prawa i normalizacja, diagnostyka i ocena stanu technicznego istniejących konstrukcji, materiały i technologie stosowane w naprawach i wzmocnieniach, analiza obliczeniowa istniejących konstrukcji, sposoby napraw i wzmocnienia konstrukcji. Inauguracyjny wykład pt. „Awarye i katastrofy obiektów betonowych. Błędy projektowe jako powody niedomagania konstrukcji” podczas uroczystego otwarcia wygłosił prof. Piotr Noakowski. Podczas czterodniowych obrad plenarnych, w VII zróżnicowanych tematycznie sesjach wygłoszono 33 wykłady, których układ i scenariusz opracowany został przez prof. Łukasza Drobca. Materiał wykładowy został opublikowany w trzech tomach na ponad 2100 stronach. Materiały konferencyjne uzupełniły „warsztatową bibliotekę projektanta” tworzoną nieprzerwanie od 1998 r. Tradycyjnym tłem warsztatów była prezentacja 26 wystawców – firm branżowych oraz 9 partnerów warsztatów. Podczas konferencji nadano godności Członka Honorowego Komitetu Organizacyjnego prof. Radosławowi Jasińskiemu. Otwarcie konferencji było także okazją do złożenia życzeń Honorowemu Członkowi PZITB, Honorowemu Członkowi Komitetu Organizacyjnego i Honorowemu Profesorowi Politechniki Śląskiej – prof. Włodzimierzowi Starsolskiemu, który obchodził jubileusz 90. urodzin. Pierwszy dzień konferencji zakończył koncert artysty młodego pokolenia – saksofonisty Daniela Bobera, kolejny wieczór to prezentacja dr. Sebastiana Chachołka (założyciela i kustosa Muzeum Magicznego Realizmu w Wiśle) „Magiczna Wisła...”, później mieliśmy okazję obejrzeć występ Zespołu „7 niebo”. Tradycyjnie uhonorowano wykładowcę, który od 1998 roku wykazał się szczególną aktywnością i opracował najwięcej wykładów, „góralski kapelus i ciupaga” przypadły prof. Adamowi Zyburze z Politechniki Śląskiej.

• **XXXVIII WPPK-2024.** Warsztaty odbyły się w Wiśle. Głównym organizatorem był Oddział PZITB z Bielska-Białej przy współpracy Oddziałów z Gliwic, Katowic i Krakowa. Komitetowi Organizacyjnemu przewodniczył Janusz Kozula, a merytoryczne przygotowanie programu wykładów powierzono prof. Łukaszowi Drobcowi. W konferencji udział wzięło około 300 uczestników, w tym wielu członów Placówki Terenowej ŚOIIB w Bielsku-Białej i naszego Oddziału PZITB, a wśród zaproszonych gości byli: przewodnicząca PZITB Maria Kaszyńska, przewodniczący Małopolskiej Okręgowej Izby Inżynierów Budownictwa – Mirosław Boryczko i przewodniczący Śląskiej Okręgowej Izby Inżynierów Budownictwa – Roman Karwowski. Podczas obrad plenarnych w 9 sesjach wygłoszono 31 wykładów problemowych poruszających temat przepisów prawa budowlanego i norm, diagnostyki i oceny stanu technicznego istniejących konstrukcji, fizyki budowli, izolacji, sposobów napraw i wzmocnień elementów konstrukcji. Podczas uroczystego otwarcia warsztatów wykład inauguracyjny pt. „Metody techniki i diagnozowania konstrukcji budowlanych” wygłosił prof. Jerzy Hoła. Jak co roku, przekazano uczestnikom konferencji wydawnictwo zawierające komplet 31 wykładów i prezentacji partnerów konferencji oraz wystawców w trzech tomach lub w formie elektronicznej. Materiały te powiększą biblioteczkę inżyniera budowlanego i będą praktyczną pomocą dla projektantów, kierowników budów i inspektorów nadzoru. Tradycyjnie warsztatom towarzyszył salon wystawców, na którym nowe technologie i wyroby budowlane prezentowało 31 firm branżowych i 6 partnerów konferencji. Wieczorem pierwszego dnia uczestnicy konferencji wysłuchali występu Bożeny Boby-Dygi z zespołem. W drugim dniu zorganizowano integracyjne spotkanie w formie Turnieju Bowlingu. W kolejnym dniu konferencji zorganizowano spotkanie wykładowców z Komitetem Organizacyjnym, podczas którego tradycyjnie uhonorowano kolejnego wykładowcę za aktywność w przygotowaniu wykładów. „Kapelusz góralski i ciupagę” otrzymał prof. Krzysztof Gromysz. Na tym spotkaniu zaprezentowany został 30-minutowy film z konferencji w 1999 roku, który zrealizował Jan Wiśniowski. Przypomniął on czasy, gdy konferencje odbywały się w Ustroniu w słynnych „piramidach”.

• **XXXIX WPPK-2025.** Zeszłoroczne warsztaty odbyły się w Wiśle w Hotelu „Cristal Mountain”. Wiodącym organizatorem konferencji był Oddział Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa z Katowic, we współpracy z Oddziałami PZITB z Bielska-Białej, Gliwic i Krakowa. Komitetowi Naukowemu przewodniczył prof. Jan Zamorski z Uniwersytetu Bielsko-Bialskiego, a Komitetowi Organizacyjnemu – Andrzej Szydłowski z Katowickiego Oddziału PZITB. Tematyka konferencji obejmowała konstrukcje metalowe, posadzki przemysłowe, lekką obudowę i rusztowania w rozpoczętym w 2023 roku cyklu „Naprawy

i wzmocnienia konstrukcji”. Było to powtórzenie tematyki z 2016 roku w wydaniu uwzględniającym zmiany technologiczne, materiałowe i normalizacyjne, postępujące na przestrzeni kilku lat. Warsztaty zaszczylił swoją obecnością prof. Maria Kaszyńska, przewodnicząca PZITB oraz Mirosław Boryczko i Roman Karwowski, przewodniczący rad okręgowych Małopolskiej i Śląskiej OIIB. Program konferencji zawierał 6 sesji tematycznych, na które złożyło się ponad 30 wykładów problemowych, wykłady techniczne firm specjalistycznych oraz wystąpienia promocyjne. Wykłady zostały zamieszczone w 3 recenzowanych tomach „Monografii” wydanej przez Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Bielsko-Bialskiego. Kilka wykładów nie było wygłaszanych na sali, ich autorzy udzielali zainteresowanym informacji przy posterach. W „Materiałach konferencyjnych” zamieszczono informacje techniczno-promocyjne. Każdy z uczestników otrzymał wraz z materiałami z konferencji zaświadczenie o uczestnictwie w szkoleniu. Warsztatom towarzyszyły stoiska wystawiennicze, na których swoje produkty w postaci wyrobów budowlanych, technologii i programów komputerowych prezentowało 27 firm. W trzydziestej dziewiątej edycji WPPK 2025 uczestniczyły 392 osoby. Trzy bardzo intensywne dni warsztatowe zostały wypełnione przez cieszące się dużym zainteresowaniem wykłady, podsumowywane dyskusją merytoryczną, konsultacje z wykładowcami, rozmowy z wystawcami, wymianę doświadczeń zawodowych. W ramach warsztatów odbyło się także spotkanie przewodniczących oddziałów PZITB z południa Polski oraz członków Komitetu Organizacyjnego z wykładowcami. Organizatorzy zadbal również o uatrakcyjnienie wieczorów. W pierwszym dniu konferencji zaplanowano panel dyskusyjny dotyczący zmian w przepisach ustawy Prawo budowlane. Moderatorem dyskusji był Tomasz Radziewski, przy uczestnictwie Małgorzaty Boryczko i Joanny Smarż. Drugiego wieczoru miał miejsce występ śląskiego zespołu wokально-instrumentalnego „Śąsiedzi”.

Jubileusz 40-lecia Ogólnopolskich Warsztatów Pracy Projektanta Konstrukcji – to przede wszystkim ludzie, którzy je tworzyli, tworzą i będą tworzyć. Nasi koledzy-członkowie pokazali, jaką siłę ma wspólne działanie 4 Oddziałów PZITB: Bielsko-Białego, Gliwickiego, Katowickiego i Małopolskiego. Od 40 lat tworzą konferencję, która przyciąga projektantów, konstruktorów, wykonawców w Beskidy, żeby móc się szkolić i zdobywać wiedzę. To historia inżynierów i ich pracy od kalek i desek kreślarskich do rzeczywistości wirtualnej i sztucznej inteligencji. Dziękujemy Członkom Honorowym WPPK i organizatorom za ich pracę i do zobaczenia na kolejnych warsztatach.

Mirosław Boryczko – ku pamięci Janusza Krasnowskiego – z podziękowaniami dla Jego córki Beaty za przekazanie materiałów archiwalnych.

Członkowie Honorowi Warsztatów Pracy Projektanta Konstrukcji (WPPK)

W 2008 roku, niemal ćwierć wieku po zainicjowaniu pierwszej edycji Warsztatów Pracy Projektanta Konstrukcji (WPPK), przewodniczący Oddziałów PZITB zaangażowanych w organizację konferencji podjęli decyzję o uhonorowaniu osób szczególnie zasłużonych w jej rozwoju. W rezultacie ustanowiono godność Członka Honorowego Komitetu Organizacyjnego Konferencji WPPK.



Obrady Członków Honorowych WPPK w roku 2016 w Gliwicach – od lewej: Janusz Krasnowski, Włodzimierz Starosolski, Janusz Kozula, Zbigniew Dzierżewicz, Zbysław Kałkowski, Janusz Kawecki

Wyróżnienie to przyznawane jest za wybitne i wieloletnie zaangażowanie w działalność komitetu, ze szczególnym uwzględnieniem wkładu w tworzenie i rozwój warsztatów oraz inicjowanie nowatorskich rozwiązań o charakterze merytorycznym i organizacyjnym.

Do grona Członków Honorowych mogą być powoływane osoby należące do czterech Oddziałów PZITB współorganizujących konferencję: w Bielsku-Białej, Gliwicach, Katowicach oraz Oddziału Małopolskiego w Krakowie. Godność nadawana jest przez Kapitułę, w skład której wchodzi przewodniczący wskazanych oddziałów PZITB oraz osoby już nią uhonorowane.

Uroczyste wręczenie wyróżnienia odbywa się podczas



Spotkanie Członków Honorowych WPPK w roku 2016 w Gliwicach – od lewej: Zbysław Kałkowski, Janusz Kawecki, Włodzimierz Starosolski, Zbigniew Dzierżewicz, Janusz Krasnowski, Janusz Kozula

inauguracji konferencji WPPK. Aktu nadania dokonują: Senior Kapituły oraz przewodniczący Komitetu Organizacyjnego. Osoba wyróżniona otrzymuje dyplom oraz uzyskuje prawo uczestnictwa w cyklicznych spotkaniach Komitetu Organizacyjnego czterech oddziałów, a także bezpłatnego udziału w kolejnych edycjach konferencji.

Godność przyznawana jest nie rzadziej, niż co dwa lata. Wyjątek stanowiło pierwsze posiedzenie Kapituły w 2008 roku, podczas którego wyróżniono cztery osoby. W czterdziestoletniej historii warsztatów tytuł Członka Honorowego Komitetu Organizacyjnego WPPK otrzymało łącznie 11 osób. Poniżej przedstawiono zestawienia w układzie chronologicznym oraz z podziałem na oddziały PZITB.

Członkowie Honorowi Warsztatów Pracy Projektanta Konstrukcji – WPPK (w kolejności chronologicznej według nadania godności):

- 2008 rok: Zbysław Kałkowski – Oddział Małopolski PZITB w Krakowie, Janusz Krasnowski – Oddział PZITB w Katowicach, Henryk Raszka – Oddział PZITB w Bielsku-Białej, Włodzimierz Starosolski – Oddział PZITB w Gliwicach;
 - 2010 rok: Zbigniew Dzierżewicz – Oddział PZITB w Katowicach, Edward Motak – Oddział Małopolski PZITB w Krakowie;
 - 2012 rok: Ireneusz Józwiak – Oddział PZITB w Gliwicach/Katowicach;
 - 2014 rok – Janusz Kozula – Oddział PZITB w Bielsku-Białej;
 - 2016 rok: Janusz Kawecki – Oddział Małopolski PZITB w Krakowie;
 - 2019 rok: Andrzej Nowak – Oddział PZITB w Katowicach;
 - 2023 rok: Radosław Jasiński – Oddział PZITB w Gliwicach.
- Członkowie Honorowi Warsztatów Pracy Projektanta Konstrukcji – WPPK (według przynależności do oddziałów):
- Oddział Małopolski PZITB w Krakowie: 2008 rok – Zbysław Kałkowski, 2010 rok – Edward Motak, 2016 rok – Janusz Kawecki;
 - Oddział PZITB w Katowicach: 2008 rok – Janusz Krasnowski, 2010 rok – Zbigniew Dzierżewicz, 2019 rok – Andrzej Nowak;
 - Oddział PZITB w Bielsku-Białej: 2008 rok – Henryk Raszka, 2014 rok – Janusz Kozula;
 - Oddział PZITB w Gliwicach: 2008 rok – Włodzimierz Starosolski, 2012 rok – Ireneusz Józwiak, 2023 rok – Radosław Jasiński.

Redakcja „Przeglądu Budowlanego”



Dajemy nowe życie terenom zanieczyszczonym

badania geotechniczne i środowiskowe

- badania geologiczne i geotechniczne, w tym w miejscach o ograniczonej dostępności
- badania środowiskowe in-situ wykonywane metodą MIHPT oraz OIHPT
- badania środowiskowe, w tym metodą direct-push
- akredytowane pobieranie próbek gruntu i wody podziemnej
- sporządzanie dokumentacji z przeprowadzonych badań
- monitoring środowiska

oczyszczanie środowiska wodno-gruntowego

- prace remediacyjne – in-situ/on-site/ex-situ
- rekultywacja/rewitalizacja



www.remea.pl



Zeskanuj kod
i poznaj nasze
rozwiązania



Rusztowania na budowie i nie tylko – kompleksowe spojrzenie

Temat rusztowań i ich bezpiecznego użytkowania wraca od lat jak bumerang. Niestety na ogół przy okazji wypadków i ofiar tych wypadków. Problem z rusztowaniami stwierdzany jest więc właśnie dopiero w takich okolicznościach na budowie lub w miejscu ich użytkowania. Ale zaczyna się zupełnie gdzie indziej. Co więcej, nie zaczyna się, ale trwa od lat i jest pogłębiany oraz utrwalany kolejnymi regulacjami, mającymi jedynie rozwiązać aktualny, fragmentaryczny dylemat, nieuwzględniającymi natomiast kompleksowej problematyki związanej z rusztowaniami.

Nie ułatwia sprawy również fakt, iż rusztowania wykorzystywane są w wielu branżach. Potoczne skojarzenie rusztowań z budownictwem jako główną gałęzią gospodarki, w której są wykorzystywane, jest błędne i mylące. W rzeczywistości w budownictwie wykorzystywane jest co najwyżej 40% rusztowań. Pozostała część przypada na przemysł, rozrywkę, produkcję itp.

W artykule autorzy skoncentrują się na budownictwie, nie zapominając jednak o innych zastosowaniach rusztowań.

Kiedy technika przestaje być winna

W powszechnej świadomości przeciętnego uczestnika procesu budowlanego głównymi przyczynami wypadków przy pracy na rusztowaniach są: błąd człowieka, zła organizacja prac, pośpiech, lekceważenie zasad bezpieczeństwa albo źle wykonana konstrukcja. To wszystko prawda, co więcej potwierdzają to powypadkowe statystyki. Tyle że jest to prawda niepełna. Odnosi się ona już do bezpośrednich przyczyn wystąpienia wypadku, natomiast przyczyny te mają swoje praprzyczyny. Od lat dysponujemy nowoczesnymi, stale udoskonalanymi systemami rusztowań, rozwiniętymi środkami ochrony zbiorowej, procedurami bezpieczeństwa oraz ogromną wiedzą techniczną. Mimo to prace na wysokości nadal należą do najniebezpieczniejszych obszarów działalności. Dane Państwowej Inspekcji Pracy regularnie pokazują gigantyczną skalę nieprawidłowości, a rusztowania pozostają jednym z najczęściej wskazywanych źródeł zagrożeń. Wyniki akcji „Budowa – stop wypadkom” prowadzonej przez PIP w latach 2022–2024 w ramach strategii kontroli i prewencji dla sektora budowlanego jednoznacznie pokazały skalę problemu. Niezależnie od rodzaju kontrolowanej budowy problemy związane z niekompletnością, błędnym montażem lub nieprawidłowym użytkowaniem rusztowań stwierdzano na ponad 70% kontrolowanych budów, a podczas rekontroli poziom nieprawidłowości dalej znacząco przekraczał 60%. Szczególnie dramatyczne wyniki dotyczyły budów małych, gdzie nieprawidłowości stwierdzono na ponad 9 z każdych 10 kontrolowanych budów.

Powstaje więc pytanie: skoro technologia jest dostępna, wiedza istnieje, a branża od lat inwestuje w poprawę bezpieczeństwa, dlaczego problem nie znika? Odpowiedź jest bardzo niewygodna. Główne źródło problemu znajduje się nie w miejscu użytkowania rusztowań, lecz w systemie regulacyjnym, który przez dziesięciolecia był budowany fragmentami, interwencyjnie, bez spójnej wizji i bez zrozumienia specyfiki rusztowań jako odrębnego obszaru technicznego.

Historia łatania zamiast projektowania

Dzisiejszy stan prawny nie jest rezultatem świadomie zaprojektowanego systemu. To raczej efekt niemal stu lat kolejnych nowelizacji, dopisków, wyjątków i prób dostosowywania starych rozwiązań do nowych realiów i często dość przypadkowych prób łączenia obszarów tak naprawdę ze sobą niezwiązanych. W rezultacie rusztowania pojawiają się w ponad 20 aktualnie obowiązujących aktach prawnych, ale wciąż nie doczekały się jednej, spójnej i powszechnie obowiązującej definicji. W zależności od tego, który przepis czytamy, rusztowanie może być konstrukcją, konstrukcją budowlaną, urządzeniem, maszyną. Często pojawiają się również definicje pośrednie, które pozwalają na zdefiniowanie rusztowania dopiero po zastosowaniu wykładni językowej.

To nie jest problem semantyczny. Jeżeli ten sam obiekt techniczny jest różnie definiowany przez różne akty prawne, nieuchronnie pojawiają się rozbieżności dotyczące odpowiedzialności, kwalifikacji zawodowych, wymagań technicznych, zasad nadzoru i dopuszczalnych zasad użytkowania. W efekcie uczestnicy rynku mają do czynienia z rzeczywistością, w której zmuszeni są do funkcjonowania w oparciu o indywidualną interpretację przepisów, a nie jednoznaczne wytyczne.

Paradoks polskiego systemu

Być może najbardziej wymownym przykładem tego chaosu jest system nadawania uprawnień monterów rusztowań. Monter rusztowań buduje, przebudowuje lub demontuje

tymczasową, często skomplikowaną konstrukcję, od której zależy zdrowie i życie innych ludzi, przebywających później w jej pobliżu lub na niej pracujących. Monter rusztowań musi więc doskonale rozumieć zasady montażu, stateczności, obciążeń, organizacji pracy oraz bezpieczeństwa pracy na wysokości. Jest oczywiste, że aby taką wiedzę zdobyć, potrzebna jest nie tylko specjalistyczna wiedza, ale również bogate doświadczenie.

Tymczasem w polskim systemie prawnym monter rusztowań został włączony do systemu kwalifikacji dla operatorów maszyn budowlanych. W pośpiechu porządkowania aktów prawnych po uchwaleniu Konstytucji, tematykę montażu rusztowań dołączono do obszaru (wywodzącego się zresztą z lat 50. ubiegłego wieku) związanego z obsługą maszyn w miejsce wycofanych z tego obszaru lokomotyw.

W efekcie tych rozwiązań osoba chcąc uzyskać uprawnienia montera (de facto bez ograniczeń), nie musi przedstawiać żadnych zaświadczeń o stanie zdrowia lub posiadanym doświadczeniu, winna natomiast odbyć krótki kurs oraz zdać pobieżny egzamin, po którym otrzymuje dokument o nazwie „książka operatora”, choć operatorem żadnej maszyny nie jest. Co więcej, bez względu na później zdobywaną praktykę lub jej całkowity brak uprawnienia takie nadawane są dożywotnio bez praktycznej możliwości ich utraty lub wygaśnięcia. Trudno o lepszy symbol problemu. Państwo od ponad dwóch dekad próbuje zarządzać bezpieczeństwem rusztowań za pomocą nadpisywanych, uzupełnianych i aktualizowanych aktów prawnych stworzonych dla zupełnie innej rzeczywistości technicznej. To nie jest tylko kwestia nazewnictwa. To dowód, że przez lata zaobserwowane problemy rozwiązywano poprzez dokładanie kolejnych regulacji do istniejących konstrukcji prawnych, zamiast stworzyć system odpowiadający rzeczywistym potrzebom i możliwościom rynku. Co więcej, nawet przedstawiane projekty nowych ustaw nie porządkują wieloletnich zaniedbań i bałaganu, ale powielają je. Jednoznacznie należy stwierdzić, że brakuje kompleksowego podejścia do problematyki rusztowań w sposób adekwatny do aktualnej wiedzy technicznej i gwarantujący stworzenie jednoznacznych, bezpiecznych zasad pracy z wykorzystaniem rusztowań. Kolejnym paradoksem są uprawnienia do odbioru zmontowanych rusztowań. Zgodnie z obowiązującymi przepisami może ich dokonać „... kierownik budowy lub uprawniona osoba”, przy czym system nigdzie nie definiuje, kto jest uprawnioną osobą. W branży budowlanej pozostaje więc kierownik budowy, na którego zresztą jak w większości tematów zrzucona jest wyłączna odpowiedzialność. Co natomiast z rusztowaniami stosowanymi poza budownictwem, a jak zaznaczono wyżej, dotyczy to co najmniej 60% przypadków wykorzystywania rusztowań? Tam kierownika budowy nie ma. Pozostaje

więc jedynie stworzyć indywidualną interpretację, kto jest „uprawniony”. Czy to rozwiązuje problem? Tylko do czasu wypadku, a później w statystyce jako jego przyczynę znajdujemy po raz kolejny błąd ludzki lub organizacyjny. I nawet jeśli się z tym zgodzić, to trzeba dodać, że jest to na ogół błąd w interpretacji niejednoznacznych zapisów prawa.

Branża budowlana osiągnęła samodzielnie bardzo dużo, jednak bez systemowych regulacji dalsza poprawa bezpieczeństwa nie jest możliwa.

Po zaistnieniu wypadku najłatwiej szukać winnego wśród pracodawców lub pracowników. Znacznie trudniej zauważyć, co dotychczas osiągnęła branża budowlana dzięki samodzielnym, oddolnym inicjatywom. W ciągu ostatnich kilkunastu lat liczba śmiertelnych wypadków w budownictwie znacząco spadła. Z regularnych 100–120 ofiar śmiertelnych rocznie do poziomu 40–60 rocznie. Dalej jednak wypadkowość jest wyzwaniem dla branży, gdyż trudno pogodzić się z każdym z zaistniałych wypadków. Należy jednak podkreślić, że już uratowano kilkaset istnień ludzkich. Zupełnie oddolnie, z inicjatywy największych firm budowlanych powstały standardy bezpieczeństwa, rozwinęły się programy szkoleniowe, a organizacje takie jak Porozumienie dla Bezpieczeństwa w Budownictwie stworzyły rozwiązania daleko wykraczające poza minimalne wymagania prawne. To właśnie tutaj pojawia się kolejny paradoks. Najwięksi uczestnicy rynku samodzielnie wdrażają coraz bardziej zaawansowane procedury, a mimo to nadal obserwują powtarzające się problemy: błędy organizacyjne, niewystarczające kompetencje, niejednoznaczność odpowiedzialności i trudności związane z odbiorami rusztowań. Innymi słowy branża osiągnęła granice skuteczności działań oddolnych. Można tworzyć najlepsze standardy. Można szkolić tysiące pracowników. Można prowadzić kampanie edukacyjne i kontrole. Nie da się jednak zastąpić spójnego systemu prawnego. Dla porównania można sobie wyobrazić, jaki mielibyśmy poziom bezpieczeństwa na drogach, gdyby nie obowiązywało Prawo o ruchu drogowym, a zasad bezpieczeństwa na drogach uczylibyśmy się w ramach oddolnie organizowanych inicjatyw i szkoleń.



Fot. Skarszewy/DziennikBałtycki.pl

Niestety w przypadku regulacji dotyczących rusztowań mamy do czynienia z historycznym chaosem.

Obecnie obowiązujące regulacje dotyczące szeroko pojętej problematyki rusztowań oraz metody jej naprawy najlepiej obrazuje stan drogi przedstawionej na pierwszej fotografii.

Są gotowe rozwiązania, wystarczy do nich sięgnąć

Doświadczenia europejskie pokazują, że skuteczniejsze systemy bezpieczeństwa nie opierają się wyłącznie na kontrolach i wymaganiach formalnych. Na przykład w Niemczech kluczową rolę odgrywa stopniowy rozwój kompetencji zawodowych. Uprawnienia są powiązane z praktyką, doświadczeniem i kolejnymi poziomami odpowiedzialności. We Francji z kolei poważne zdarzenia wypadkowe doprowadziły do głębokich zmian regulacyjnych obejmujących zarówno kwalifikacje, jak i wymagania techniczne dotyczące rusztowań. W obu przypadkach punktem wyjścia było założenie, że bezpieczeństwo jest wynikiem działania całego systemu. W Polsce nadal naiwnie zakładamy, że wystarczy dopisać kolejny obowiązek, stworzyć kolejne szkolenie albo przeprowadzić następną kontrolę.

Historia ostatnich dekad pokazuje, że takie podejście jest nieskuteczne.

Potrzebna jest reforma, a nie kolejna nowelizacja

Najważniejszym wnioskiem płynącym z doświadczeń branży, danych kontrolnych i analiz ekspertów jest to, że bezpieczeństwa pracy na rusztowaniach nie da się już znacząco poprawić metodą korekt. Nie wystarczy kolejny kurs. Nie wystarczy kolejna kampania informacyjna. Nie wystarczy kolejna nowelizacja pojedynczego rozporządzenia. W ten sposób podobnie jak przez ostatnie lata będziemy po raz kolejny jedynie definiowali bezpośrednie przyczyny wypadków. Bezpośrednie, ale jednak cały czas wtórne. Nie poprawimy natomiast bezpieczeństwa. Konieczne jest zajęcie się przyczyną, czyli całym systemem

prawnym dotyczącym rusztowań i pracy z ich wykorzystaniem. Bezwzględnie potrzebny jest spójny system obejmujący: definicję rusztowania, wymagania jakościowe dotyczące wykorzystywanych systemów i elementów, zasady kwalifikacji zawodowych, kompetencje osób dokonujących montażu, odbiorów, przeglądów, demontażu jak również pracujących na zmontowanych już rusztowaniach oraz jednolite zasady odpowiedzialności za bezpieczeństwo uwzględniające miejsce i okoliczności stosowania rusztowań, nie tylko w budownictwie.

Brzmi ambitnie. Ale dokładnie tak samo brzmiały przed kilkunastu laty pomysły dotyczące systemowego podejścia do bezpieczeństwa w całym budownictwie. Rękawica została oddolnie podjęta i dzięki temu setki osób żyje i pracuje, a jeszcze większa rzesza, również dalej pracująca, nie jest inwalidami wskutek wypadków ciężkich, o których słyszy się rzadziej niż o śmiertelnych, choć są one dużo częstsze. Teraz czas na tworzącego prawo, czyli na państwo. Jakby to brutalnie nie zabrzmiało, to właśnie państwu powinno zależeć najbardziej na zdrowych i sprawnych obywatelach, pracujących przecież również na rozwój tego państwa. Koszty wypadków są istotnym obciążeniem społecznym oraz finansowym. W tym zakresie powinni to rozumieć nie tylko ministrowie technicznych gałęzi gospodarki, ale jeszcze bardziej ministrowie zdrowia, polityki socjalnej, a przede wszystkim finansów. To główny regulator prawa powinien zadać sobie pytanie, czy stać go na utratę setek obywateli w wieku produkcyjnym. Jeśli odpowiedź brzmi NIE, wiadomo co trzeba robić, a jeśli brzmi TAK, to już temat dla zupełnie innego specjalisty.

Najwyższy czas na zmianę podejścia

Aktualnie zagrożeniem nie jest brak wiedzy. Nie jest nim również brak technologii. Największym zagrożeniem staje się zaniechanie oraz przekonanie, że obecny system można jeszcze po raz kolejny poprawiać. W rzeczywistości to właśnie próby dopisywania uwarunkowań wynikających z aktualnie dostępnych technologii oraz wiedzy do historycznych przepisów, kolejne łatania ich, dość przypadkowe, interwencyjne łączenie ich lub rozdzielanie doprowadziło do interpretacyjnego chaosu generującego ciągle zbyt dużo ofiar. Aktualny stan systemu prawnego w zakresie rusztowań prezentuje pierwsza z fotografii. A oczywiście jest, aby dążyć do stanu widocznego na fotografii kończącej ten artykuł.

Urszula Gawrysiak,
Dyrektor, Porozumienie dla
Bezpieczeństwa w Budownictwie
mgr inż. **Michał Wrzosek**
Przewodniczący Komitetu Maszyn
i Urządzeń Budowlanych przy Polskim
Związku Pracodawców Budownictwa



Fot. Grażyna Szlęzak – Radio Kielce



STANDARDY BHP

2.1 Roboty na dużych wysokościach



Standard ten zawiera minimum wymagań, jakie należy spełnić dla zapewnienia bezpieczeństwa podczas robót na dużych wysokościach.

UWAGA

Roboty wykonywane na dużych wysokościach, wieżach, masztach i innych konstrukcjach są zaliczane do **prac szczególnie niebezpiecznych (3)**. Upadek z wysokości może zakończyć się śmiercią lub trwałym kalectwem. Niniejszy standard pozwoli na zwiększenie bezpieczeństwa pracowników realizujących tego rodzaju prace.

A. WSTĘP

1. Według warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, obiekty o wysokości od 25 m zaliczane są do wysokich, a od 55 m - do wysokościowych. Rozszerzając to kryterium, wszelkie prace przy realizacji wysokich obiektów przemysłowych, budynków wysokich i wysokościowych, a także w energetyce (maszty, kominy, bloki energetyczne), należy zaliczać do robót na dużych wysokościach.
2. Szczególne niebezpieczeństwo prowadzenia prac na dużych wysokościach jest związane zarówno z miejscem, jak i z czynnikami zewnętrznymi (warunki atmosferyczne, kształt, lokalizacja i dostęp do obiektu, usytuowanie obiektów sąsiadujących).
3. Projektując budynki i obiekty wysokie i wysokościowe, należy przewidywać i planować nie tylko bezpieczne metody ich wznoszenia, ale także bezpieczne metody prowadzenia prac związanych z eksploatacją i konserwacją (np. mycie zewnętrznych szyb i elewacji, naprawy czy ewakuacja ludzi na wypadek pożaru). Projektanci obiektów i budynków wysokich i wysokościowych powinni zaproponować rozwiązania oparte na systemach ochron zbiorowych. Do ich obowiązków należy również wskazanie stałych punktów kotwiczenia urządzeń pomocniczych dla **środków ochrony indywidualnej (ŚOI) (15)**, chroniących przed upadkiem z wysokości. Zadaniem projektantów jest też wskazanie sposobów dostępu na czas prowadzenia takich robót. (Rys. 1a i 1b) – pokazujący budynek przemysłowy i wysokościowy.
4. Wyróżniamy dwa rodzaje dostępu do stanowisk pracy na dużych wysokościach:
 - dostęp budowlany - po elementach budowlanych, takich jak: schody, rusztowania, drabiny, konstrukcje żerdziowe, pomosty, dachy i inne powierzchnie płaskie, a także podnośniki i dźwigi, gdy stanowiska pracy są nie tylko wolnostojące, ale także w podparciu, w podwieszeniu i w ograniczeniu,
 - dostęp linowy, który wymaga zastosowania tzw. techniki alpinistycznej, wykorzystującej niezależnie prowadzone dwie liny: roboczą i asekuracyjną, niezależnie od siebie zakotwiczone. (Rys. 2).- obraz dostępu linowego.
5. Roboty na dużych wysokościach są zaliczane do prac wymagających szczególnej sprawności psychofizycznej. Wszyscy pracownicy przewidziani do wykonywania tego typu prac powinni posiadać odpowiednie predyspozycje zdrowotne, potwierdzone orzeczeniem lekarskim oraz certyfikat potwierdzający kwalifikacje.
6. Prace na dużych wysokościach powinny być wykonywane przez minimum dwie osoby.
7. Pracownicy powinni być tak wyposażeni i przeszkoleni, aby każdy z nich był zdolny do wejścia i zejścia z obiektu w celu przeprowadzenia akcji ratowniczej lub uczestniczenia w niej.
8. Zaleca się planowanie i prowadzenie ćwiczeń z zakresu ratownictwa podczas robót na dużych wysokościach. W ćwiczeniach powinny uczestniczyć wybrane zespoły pracowników objętych tzw. grupami ratowniczymi.
9. Plan **BIOZ (2)** powinien zawierać szczegółowe wskazówki dotyczące działań ratowniczych, które należy przeprowadzić, jeśli wystąpi taka konieczność. Szczegółowe wytyczne powinny znajdować się w **IBWR (22)/ ORZ (13)**, a także w opracowanym Planie ewakuacji.

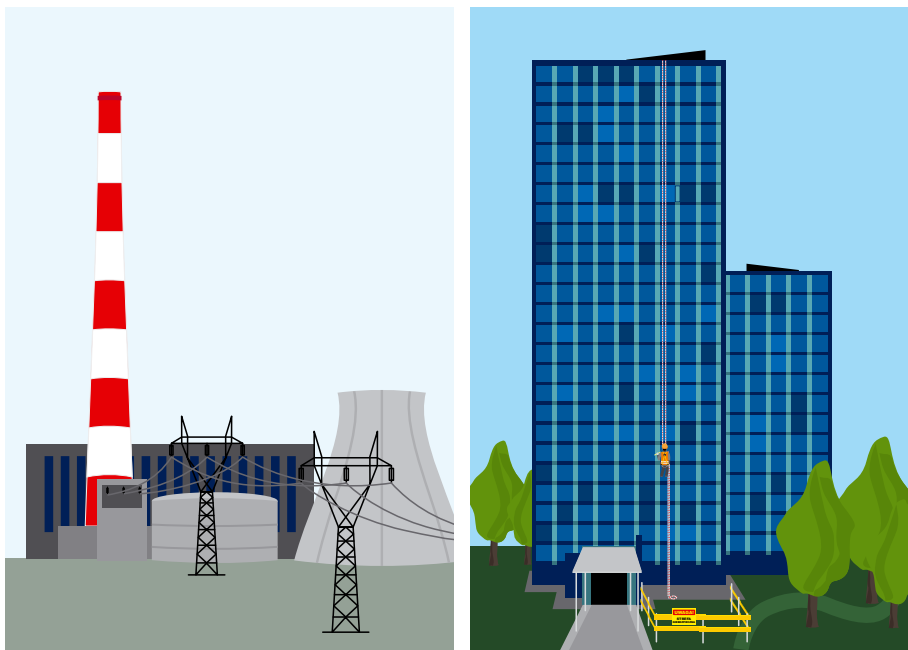


wer. 1 / 01.2023



Porozumienie
dla Bezpieczeństwa
w Budownictwie

STANDARDY
BHP

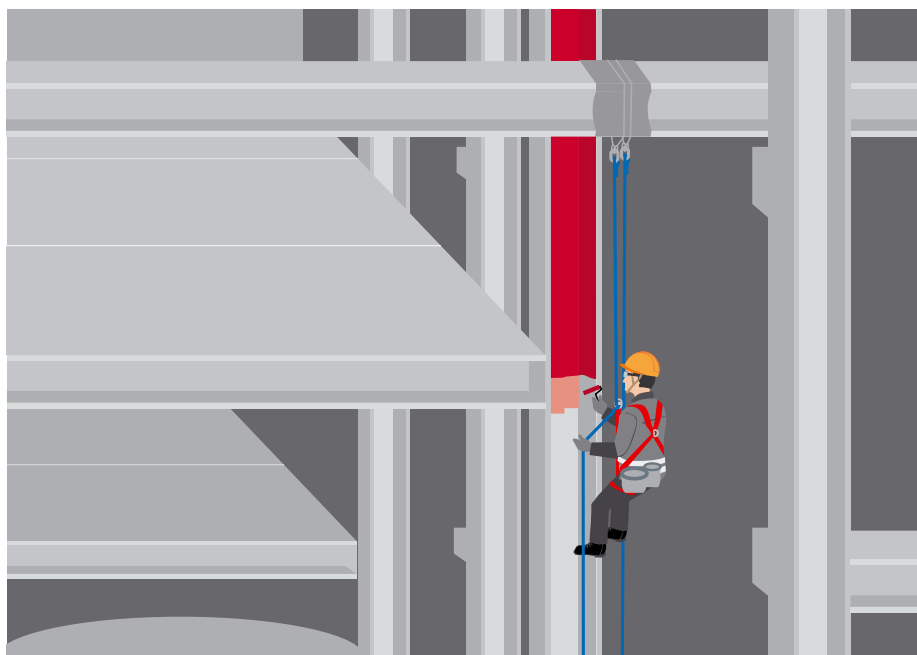


Rysunek 1a/1b. Budynek przemysłowy i wysokościowy.

10. Zasady przygotowania dokumentów związanych z ewakuacją i ratownictwem określa **Standard 17.5. Plan ewakuacji, instrukcje awaryjne.**
11. Wszelkie roboty na dużych wysokościach muszą być zaplanowane z uwzględnieniem bezpieczeństwa pracy i prognozowanych warunków pogodowych. Wskazane jest monitorowanie stanu pogody z wyprzedzeniem co najmniej zmiany roboczej.

B. DZIAŁANIA PRZED ROZPOCZĘCIEM ROBÓT

1. Podstawą do podjęcia pracy jest opracowanie **Instrukcji Bezpiecznego Wykonywania Robót (IBWR, 22))** dla konkretnego zadania zgodnie ze **Standardem 10.2 IBWR.**
2. Prace zaliczone do szczególnie niebezpiecznych wymienione w „Wykazie prac szczególnie niebezpiecznych” należy realizować zgodnie ze **Standardem 1.0. Prace szczególnie niebezpieczne (3).**
3. Osoby pracujące muszą być **kompetentne (7)** oraz poddawane systematycznym badaniom lekarskim, szkoleniom BHP i instruktażom związanym z występującymi zagrożeniami.
4. Pracowników należy wyposażyć w odzież i obuwie ochronne zgodnie ze **Standardami 18.5. Odzież i obuwie oraz 18.4. ŚOI (15) – sprzęt i ochrony indywidualne.**
5. Prace na dużych wysokościach powinny być objęte **bezpośrednim nadzorem (9)**, który jest odpowiedzialny za dopuszczenie pracowników do pracy. Bezpośredni nadzór sprawdza spełnienie wymagań sprzętowych, uprawnienia pracowników, rodzaj odbytego szkolenia, predyspozycje zdrowotne oraz fakt zapoznania się z IBWR (22) i ORZ (13).
6. Opracowując IBWR, należy zwrócić uwagę na:
 - możliwość zmiany warunków atmosferycznych,
 - konieczność przygotowania planu na sytuacje awaryjne,
 - sposobów ratowania pracowników, ich kwalifikacje i rolę w zespole,
 - określenie sposobu komunikacji pomiędzy pracownikami / zespołami pracowników,
 - obowiązek przeprowadzenia instruktaży i codziennych odpraw dotyczących np. sposobów zabezpieczenia terenu i innych stanowisk pracy poniżej prowadzonych robót.
7. Należy bezwzględnie wyznaczyć i oznakować **strefę niebezpieczną (6)** związaną z możliwością upadku materiałów i innych przedmiotów z wysokości.



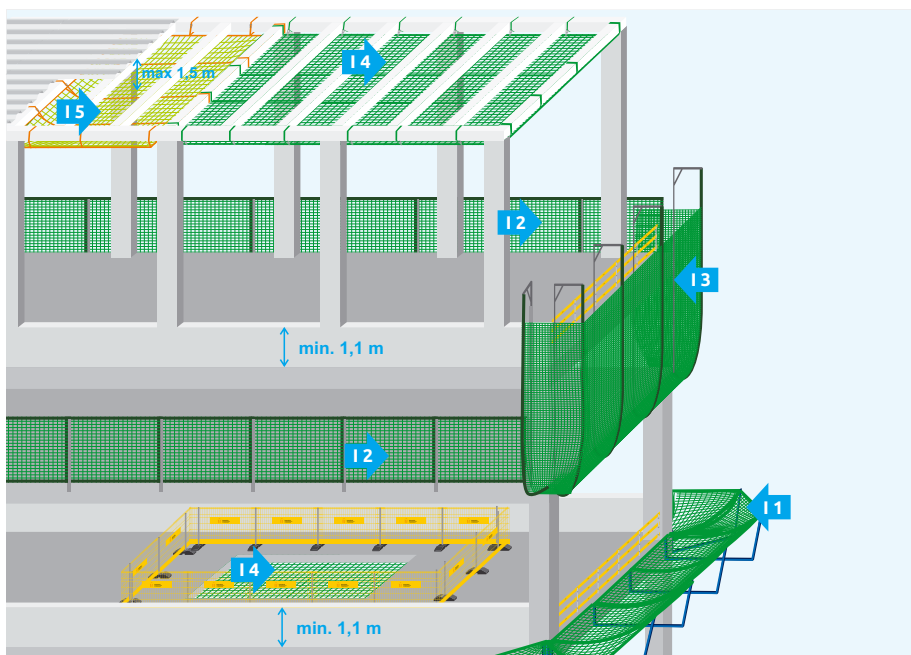
Rysunek 2. Przykładowy dostęp przemysłowy.

8. Strefa niebezpieczna (6) powinna uwzględniać maksymalną odległość od obiektu, na którym prowadzone są roboty. Jest ona uzależniona od obszaru placu budowy i technologii robót. Nie może wynosić mniejsza niż 1/10 wysokości, z której mogą spaść przedmioty, lecz nie mniej niż 6 m. W przypadku ograniczeń terenowych (np. zwarta zabudowa) strefa niebezpieczna może być zmniejszona, jednak pod warunkiem zastosowania innych rozwiązań technicznych (np. daszki, siatki wychwytujące) lub rozwiązań organizacyjnych.
Rys. 3. Przykład systemowego zabezpieczania zbiorowego chroniącego przed spadającymi materiałami, Rys. 3a. Przykład rozwiązania organizacyjnego – wyznaczenie strefy niebezpiecznej
9. Przed rozpoczęciem robót należy sprawdzić stan techniczny konstrukcji obiektu, na którym mają być prowadzone prace na dużej wysokości, w tym stabilność i wytrzymałość na przewidziane obciążenia. Kontroli podlegają również zabezpieczenia przed nieprzewidzianą zmianą położenia elementów konstrukcji, a także stan techniczny urządzeń i elementów stanowiących drogi komunikacji pionowej i poziomej oraz konstrukcje lub urządzenia stanowiące punkty kotwienia indywidualnego sprzętu chroniącego przed upadkiem z wysokości.
10. Oprócz wyposażenia pracowników w **środki ochrony indywidualnej (15)** do pracy na wysokości, należy zapewnić ochronę przed różnymi warunkami atmosferycznymi, takimi jak np.: wiatr, deszcz, zimno i słońce.
11. Planowanie prac należy także oprzeć o wymagania zawarte w **Standardzie 2.0. Prace na wysokości**.
12. Wszelkie stosowane narzędzia, elektronarzędzia i materiały należy zabezpieczyć przed upadkiem z wysokości. Narzędzia ręczne powinny być zabezpieczone przed upadkiem za pomocą linek asekuracyjnych.

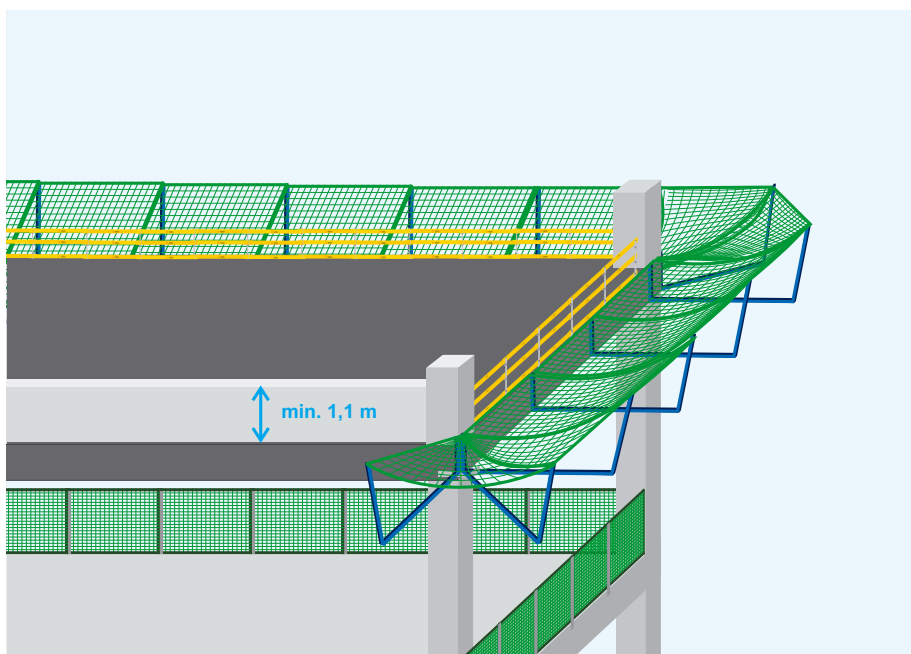


Porozumienie
dla Bezpieczeństwa
w Budownictwie

STANDARDY
BHP

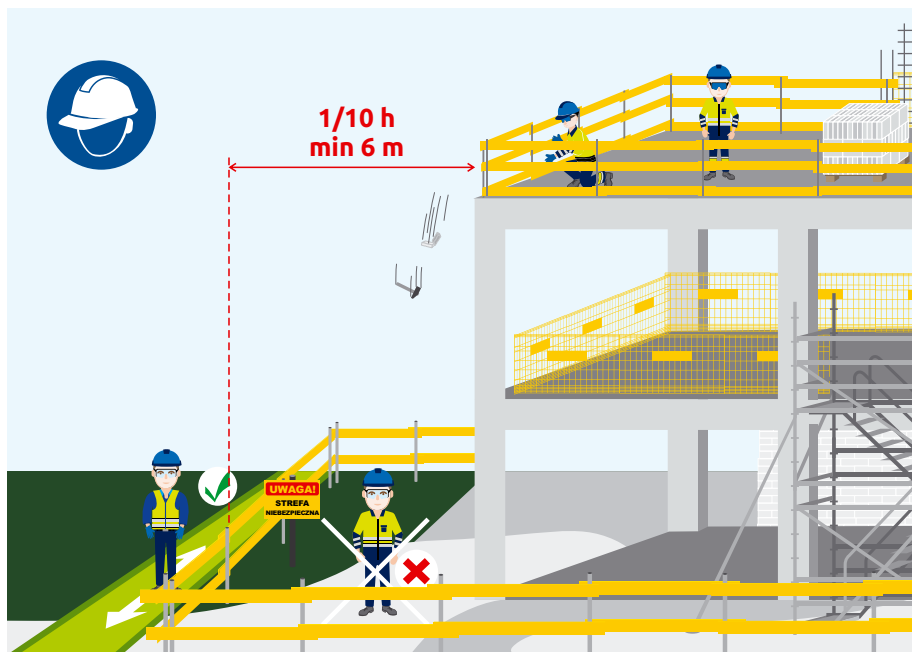


I1 - siatka typ T I2 - siatka typ U I3 - siatka typ V I4 - siatka typ S I5 - platformy robocze



Rysunek 3. Przykład systemowego zabezpieczenia zbiorowego chroniącego przed spadającymi materiałami.

wer. 1 / 01.2023



Rysunek 3a. Przykład rozwiązania organizacyjnego – wyznaczenie strefy niebezpiecznej

C. DZIAŁANIA PODCZAS PROWADZENIA ROBÓT

1. W związku z prowadzeniem prac na dużych wysokościach, w zależności od rodzaju dostępu do stanowiska pracy oraz rodzaju samego stanowiska, należy postępować zgodnie ze **Standardami 2.2 Rusztowania, 2.3 Pomosty robocze, 2.4 Drabiny, 2.5 Podesty ruchome, 2.6 Roboty na dachach**.
2. W przypadku zidentyfikowania w miejscu prowadzenia prac linii energetycznych, należy dodatkowo postępować zgodnie ze **Standardem 4.4 Praca w sąsiedztwie linii elektroenergetycznych**.
3. W przypadku wykonywania prac na obiektach usytuowanych nad akwenami wodnymi np. na pylonach obiektów mostowych, należy dodatkowo postępować zgodnie ze **Standardem 13.5 Roboty na wodzie, z wody oraz w kesonach**.
4. W przypadku składowania materiałów budowlanych i pomocniczych na wysokościach (arkusze blachy, elementy szalunkowe, materiały izolacyjne), należy ustalić sposób ich stałego zabezpieczenia przed możliwością upadku z wysokości lub niekontrolowanego przemieszczenia się.

D. DZIAŁANIA PO ZAKOŃCZENIU PRAC

1. Ze stanowisk pracy należy usunąć wszelkie niezabezpieczone narzędzia, luźne materiały i odpady.
2. Miejsce prowadzenia prac należy doprowadzić do stanu nie powodującego zagrożeń dla innych osób.
3. Osoba nadzorująca jest zobowiązana do sprawdzenia, czy wszyscy pracownicy opuścili stanowiska pracy oraz do pisemnego zamknięcia **pozwolenia na prace (18)**.



210
LAT TRADYCJI
SGGW

JUBILEUSZ WBiŚ SGGW 03 | 07 | 2026

www.wbis.sggw.edu.pl/80-lat-wbis/



80
LAT KSZTAŁCENIA
NA WYDZIALE BUDOWNICTWA
I INŻYNIERII ŚRODOWISKA

Szanowni Państwo,

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska w 2026 roku obchodzi 80-lecie kształcenia, jako jeden z najstarszych wydziałów Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, obchodzącej również Jubileusz 210-lecia. Utworzony w 1946 roku, najpierw jako Sekcja Melioracyjna, a później jako samodzielny Wydział Melioracji Wodnych, nawiązał do tradycji kształcenia w naukach technicznych i inżynierskich zapoczątkowanej jeszcze w Instytucie Agronomicznym na Marymoncie na początku XIX wieku.

Już w pierwszych programach kształcenia realizowanych na Marymoncie od 1820 roku, wykładane były przedmioty z zakresu geometrii, mechaniki, budownictwa i inżynierii wodnej, a w latach 50-tych XIX wieku w programie pojawiła się architektura przemysłowa i wiejska. Po upadku Powstania Styczniowego i zaostrej rusyfikacji, zakończono kształcenie w języku polskim i nie kontynuowano rozwoju w obszarze nauk technicznych. Do końca II wojny światowej kształcenie kadry inżynierskiej w zakresie melioracji odbywało się na wydziałach inżynierii wodnej politechnik. Już wówczas brak przyrodniczego przygotowania hydrotechników i meliorantów uznawano za poważny mankament programu studiów, mających na celu przygotowanie inżynierów do realizacji inwestycji technicznych oddziałujących na środowisko. Przeniesienie studiów melioracyjnych z Politechniki Warszawskiej do SGGW nastąpiło w 1946 roku i miały one charakter techniczny, obejmujący kursy m.in. z zakresu mechaniki, konstrukcji stalowych i żelbetowych, czy budownictwa wodnego i ogólnego.

Wzrastające znaczenie ochrony środowiska wymagało zarówno kształcenia odpowiedniej jakości kadr technicznych, jak i rozszerzenia problematyki badawczej. Zmiany te odzwierciedlano również w nazwach Wydziału. W 1989 roku pierwotną nazwę Wydziału Melioracji Wodnych zmieniono na Wydział Melioracji i Inżynierii Środowiska, w 2000 roku na Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska, a w 2011 roku na obecną – Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, natomiast od października 2026 roku będzie to Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury. Obecnie Wydział jest nowoczesnym ośrodkiem naukowym i dydaktycznym, od 2019 roku funkcjonuje na nim struktura organizacyjna oparta na dwóch instytutach badawczo-dydaktycznych, Instytucie Inżynierii Lądowej z sześcioma katedrami oraz Instytucie Inżynierii Środowiska z czterema katedrami. Oba instytuty zatrudniają obecnie prawie 250 pracowników badawczo-dydaktycznych, dydaktycznych i technicznych, co wskazuje na znaczący potencjał kadrowy. W okresie osiemdziesięciu lat istnienia działalność dydaktyczna Wydziału jest ukierunkowana na integrowanie zagadnień technicznych, budowlanych i przyrodniczych. W okresie od 1946 do 1991 roku na Wydziale prowadzone były studia na kierunku Melioracje wodne, od 1992 roku uruchomiono kierunek Inżynieria środowiska, a od 1995



roku studia na kierunku Budownictwo. W następnych latach zakres dydaktyki rozszerzono o kolejne kierunki kształcenia: Ochrona środowiska (od 2012), Inżynieria i gospodarka wodna (od 2015), Architektura krajobrazu (od 2019), Architektura (od 2024) oraz Inżynieria bezpieczeństwa (od 2025). Obecnie na Wydziale studiuje około 2500 studentów.

Wydział od założenia posiadał uprawnienia do nadawania stopni naukowych w zakresie nauk technicznych, które utracił na rzecz nauk rolniczych w 1988 roku w dyscyplinie Kształtowanie środowiska. Ponownie uzyskano uprawnienia do nadawania stopni doktora nauk technicznych w dyscyplinie Budownictwo w 2008 roku, a doktora habilitowanego nauk technicznych w 2016 roku. Od 2019 roku stopnie naukowe na Wydziale nadawane są w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych w dwóch dyscyplinach: Inżynieria lądowa, geodezja i transport oraz Inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Od początku istnienia Wydziału Rady Wydziału i Rady Dyscyplin nadały stopień naukowy doktora habilitowanego 105 osobom, a stopień doktora 273 osobom. Wielu pracowników Wydziału uzyskiwało stopnie naukowe w innych jednostkach krajowych i zagranicznych. Wydział stale podnosi jakość kształcenia i standardy badań naukowych, opartych na współpracy międzynarodowej i z otoczeniem gospodarczym. Szeroka oferta dydaktyczna i badania naukowe są prowadzone w nawiązaniu do wyzwań cywilizacyjnych i oczekiwań społecznych, związanych ze zrównoważonym rozwojem, zmianami klimatu, cyfryzacją procesów budowlanych, gospodarką niskoemisyjną i cyrkularną. Otwieramy nowe kierunki kształcenia i modyfikujemy programy dydaktyczne, uwzględniając trendy w inżynierii i budownictwie. Stwarzamy warunki do wymiany międzynarodowej studentów i młodych pracowników nauki. Nasi absolwenci uzyskują uprawnienia budowlane w różnych specjalnościach i uczestniczą w realizacji kluczowych inwestycji budowlanych w kraju i za granicą.

Artykuły prezentowane w niniejszym numerze „Przeglądu Budowlanego” pokazują, że skutecznie realizujemy interdyscyplinarny rozwój Wydziału, nawiązując do wieloletniej tradycji badawczej i dydaktycznej. Przedstawiamy wybrane prace z zakresu geotechniki, mechaniki budowli, metodologii projektowania z wykorzystaniem nowoczesnych narzędzi cyfrowych, materiałów i konstrukcji budowlanych, budownictwa zrównoważonego i gospodarki cyrkularnej, hydrotechniki i architektury historycznej i współczesnej. Dziękuję dr inż. arch. A. Piętosze za pomoc w opracowaniu redakcyjnym oraz dr inż. arch. J. Juchimiuk i dr inż. arch. M. Golańskiemu za opracowanie projektu strony tytułowej wydania jubileuszowego.

Z okazji Jubileuszu 80-lecia, wyrażam wdzięczność wszystkim, którzy stanowili i stanowią część naszej społeczności akademickiej, oraz sympatykom, jednostkom współpracującym i wspierającym rozwój Wydziału.

Prof. dr hab. inż. Eugeniusz Koda
Dyrektor Instytutu Inżynierii Lądowej SGGW

Od melioracji do budownictwa i architektury

Rys historyczny z okazji jubileuszu 80-lecia Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska oraz 210-lecia Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

prof. dr hab. inż. Eugeniusz Koda, dyrektor Instytutu Inżynierii Lądowej

prof. dr hab. inż. Janusz Kubrak, dyrektor Instytutu Inżynierii Środowiska

prof. dr hab. inż. Grzegorz Majewski, dziekan Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska

Chronologia Wydziału

Kształcenie kadry inżynierskiej w zakresie melioracji przed rokiem 1939 odbywało się na wydziałach inżynierii wodnej politechnik w ramach sekcji melioracyjnych, w tym także na Politechnice Warszawskiej. Studia te miały jednoznacznie ukierunkowany profil hydrotechniczny [1]. Już wówczas brak przyrodniczego przygotowania hydrotechników i meliorantów uznawano za poważny mankament programu studiów, mających na celu przygotowanie inżynierów do realizacji inwestycji technicznych, silnie oddziałujących na środowisko. Przeniesienie studiów melioracyjnych z Politechniki Warszawskiej do SGGW nastąpiło w roku 1946 roku z inicjatywy prof. Stanisława Turczynowicza, pełniącego wówczas funkcję dziekana Wydziału Rolniczego Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego [2, 3].

Utworzoną początkowo przy Wydziale Rolniczym SGGW Sekcję Melioracyjną zmieniono w 1948 roku w Oddział Melioracji Rolnych. W 1950 roku Oddział został przekształcony w pierwszy w Polsce Wydział Melioracji Rolnych. W 1954 roku jego nazwę zmieniono na Wydział Melioracji Wodnych, zachowując ją przez następne 35 lat do 1989 roku. Utworzenie Wydziału było uwarunkowane pilną potrzebą rozwoju infrastruktury technicznej na obszarach wiejskich, a przede wszystkim realizacji inwestycji hydrotechnicznych i melioracyjnych w zgodzie ze standardami ochrony środowiska.

Zachodzące w Polsce zmiany społeczno-gospodarcze, w tym plany rozwoju wsi i obszarów rolnych, wymagały realizacji inwestycji melioracyjnych i rozwoju infrastruktury technicznej tych obszarów. Urbanizacja kraju i udostępnienie dla produkcji rolnej nowych terenów, szczególnie w dolinach rzek nizinnych na potrzeby odpowiedniego gospodarowania wodą w rolnictwie i leśnictwie, prowadziło do zmian w środowisku przyrodniczym. Wpłynęło to na zmianę struktury wewnętrznej Wydziału. Od roku akademickiego 1954/55 na Wydziale funkcjonowało 8 katedr: Matematyki, Meteorologii i Klimatologii, Geodezji, Mechaniki Budowli i Konstrukcji Budowlanych, Gruntoznawstwa i Budownictwa Ziarnego, Budownictwa Wodnego, Melioracji Rolnych i Leśnych oraz Torfoznawstwa. W 1956 roku utworzono Katedrę Ekologii Roślin, którą w 1962 roku przemianowano na Katedrę Przyrodniczych Podstaw Melioracji. Kolejne zmiany struktury Wydziału nastąpiły w 1970 roku, kiedy decyzją władz

zewnętrznych zlikwidowano katedry i w ich miejsce utworzono trzy instytuty: Przyrodniczych Podstaw Melioracji, Melioracji Rolnych i Leśnych oraz Budownictwa Melioracyjnego i Rolniczego. W 1978 roku z trzech instytutów utworzono dwa: Instytut Budownictwa Melioracyjnego i Rolniczego oraz Instytut Melioracji i Gospodarki Wodnej. Zmiany struktury Wydziału miały spowodować lepszą koordynację działalności naukowej i dydaktycznej. Nie przyniosły one jednak oczekiwanych rezultatów i w 1982 roku przywrócono strukturę katedralną, obejmującą 9 katedr, a od 1987 roku 10 katedr. Liczbę katedr zmniejszono w 2000 roku do pięciu, a od 2011 roku do czterech.

Wzrastające z upływem czasu znaczenie ochrony środowiska, wymagało zarówno kształcenia odpowiedniej jakości kadr technicznych, jak i rozszerzenia problematyki badawczej, modyfikacji form i programów studiów oraz kierunków kształcenia. Zmiany te odzwierciedlano w nazwach Wydziału. W 1989 roku nazwę Wydziału Melioracji Wodnych zmieniono na Wydział Melioracji i Inżynierii Środowiska, w 2000 roku na Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska, a w 2011 roku na nazwę obecną – Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska [4, 5], natomiast od października 2026 roku będzie to Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury.

Na podstawie ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z 2018 roku oraz zmian Statutu SGGW od 2019 roku na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska funkcjonuje nowa struktura organizacyjna, oparta na dwóch instytutach badawczo-dydaktycznych, z wewnętrzną strukturą katedralną. Utworzono wówczas Instytut Inżynierii Lądowej oraz Instytut Inżynierii Środowiska. Każdy z instytutów zatrudnia obecnie ponad 100 pracowników badawczych, dydaktyczno-badawczych, dydaktycznych i technicznych, co wskazuje na znaczący potencjał kadrowy Wydziału. Obydwa instytuty od października 2026 roku zostaną zlikwidowane, a kadra zostanie włączona do nowego Wydziału Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury.

Kształcenie kadr

Rozwój i osiągnięcia w działalności naukowej i badawczej Wydziału potwierdzają uprawnienia do nadawania stopni naukowych. Pierwszy stopień naukowy doktora Rada Wydziału nadała w 1951 roku, a doktora habilitowanego w 1962 roku.

Wydział posiadał wówczas uprawnienia do nadawania stopnia naukowego doktora i doktora habilitowanego w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie Melioracje wodne. Do 1988 roku stopień doktora habilitowanego uzyskało 28 osób, a stopień doktora 102 osoby. Po zmianie zakresu dziedzin i dyscyplin naukowych Wydział posiadał uprawnienia do nadawania stopni naukowych w dziedzinie nauk rolniczych w dyscyplinie Melioracje wodne (od 1989 do 1992 r.), a od 1993 roku w dyscyplinie Kształtowanie środowiska. W 2011 roku nazwę dyscypliny Kształtowanie środowiska zmieniono na Ochronę i kształtowanie środowiska, nadal w naukach rolniczych. W 2008 roku Wydział uzyskał uprawnienia do nadawania stopnia doktora, a w 2016 roku stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie Budownictwo [6]. Od 2019 roku na mocy ustawy 2.0 Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, stopnie naukowe na Wydziale nadawane są w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dwóch dyscyplinach: Inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka oraz Inżynieria lądowa, geodezja i transport. Od początku istnienia Wydziału Rada Wydziału i Rady Dyscyplin nadały stopień doktora habilitowanego 105 osobom, a doktora 273. Wielu pracowników Wydziału uzyskiwało stopnie naukowe w innych jednostkach krajowych i zagranicznych.

Od powstania Wydziału do lat 70. doktoraty były uzyskiwane w trybie eksternistycznym, a później rozwijaną formą kształcenia młodych kadr naukowych były studia doktoranckie. Pierwsze stacjonarne studia doktoranckie w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie Melioracje wodne prowadzono na Wydziale w latach 1978–1981. Po kilkunastoletniej przerwie, studia te wznowiono w 1994 roku w formie 4-letnich stacjonarnych studiów doktoranckich, lecz w dziedzinie nauk rolniczych w dyscyplinie Kształtowanie środowiska. Kierownikiem tych studiów był prof. dr hab. inż. Wojciech Wolski, a od roku 1999 prof. dr hab. inż. Janusz Kubrak. W 2011 roku powołano czteroletnie dzienne studia doktoranckie w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie Budownictwo. Ich kierownikiem był prof. dr hab. inż. Kazimierz Garbulewski, a od 2017 roku dr hab. inż. Mirosław Lipiński [6]. Od 2019 roku kształcenie doktorantów na uczelni prowadzone jest w ramach interdyscyplinarnej Szkoły Doktorskiej SGGW, co umożliwia prowadzenie badań obejmujących interakcje problematyki inżynieryjnej i środowiskowej.

Dydaktyka na Wydziale

W okresie osiemdziesięciu lat istnienia działalność dydaktyczna Wydziału jest ukierunkowana na integrowanie zagadnień technicznych, budowlanych i przyrodniczych. Dostosowując do wymagań gospodarki kraju, rozszerzano profile badawcze i realizowano różne formy kształcenia na kilku kierunkach.

W okresie od 1946 do 1991 roku na Wydziale prowadzone były studia na kierunku Melioracje wodne. W 1992 roku kierunek ten zastąpiono kierunkiem Inżynieria środowiska, a od 1995 r. uruchomiono studia na kierunku Budownictwo. W następnych latach zakres dydaktyki rozszerzono o następne kierunki: Ochrona środowiska (od 2012 r.), Inżynieria i gospodarka wodna (od 2015 r.), Architektura krajobrazu (od 2019 r.), Architektura (od 2024 r.) oraz Inżynieria bezpieczeństwa (od 2025 r.). Obecnie na Wydziale studiuje około 2500 studentów.

Zgodnie z deklaracją bolońską od roku akademickiego 2003/2004 kształcenie odbywa się w systemie studiów dwustopniowych. W przypadku studiów stacjonarnych pierwszy stopień stanowi siedmiosemestralne studia inżynierskie, a w przypadku architektury ośmiosemestralne. Drugi stopień, prowadzący do uzyskania tytułu magistra, obejmuje trzy semestry studiów. Na trzech kierunkach (Civil Engineering, Environmental Engineering i Environmental Protection) studia magisterskie prowadzone są również w języku angielskim, na których wykładowcami są również profesorowie wizytujący z prestiżowych uniwersytetów zagranicznych. W przypadku studiów niestacjonarnych (Budownictwo i Inżynieria środowiska) studia trwają odpowiednio osiem i cztery semestry. Obecnie programy studiów są zatwierdzane i aktualizowane przez Rady Programowe dwóch dyscyplin naukowych: Inżynieria lądowa, geodezja i transport oraz Inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Wydział prowadzi działania zmierzające do uzyskiwania krajowych i międzynarodowych akredytacji oraz certyfikatów jakości kształcenia, potwierdzających wysoki poziom prowadzonych kierunków studiów oraz ich zgodność z międzynarodowymi

standardami i oczekiwaniami rynku pracy. Akredytacje międzynarodowe w ostatnim okresie uzyskały następujące kierunki studiów:

- kierunek Budownictwo w roku 2024 uzyskał prestiżową akredytację Komisji Akredytacyjnej Uczelni Technicznych (KAUT) oraz europejski certyfikat jakości kształcenia EUR-ACE® (European Accreditation of Engineering Programmes), zostały przyznane na lata 2024–2029;
- kierunek Architektura Krajobrazu uzyskał międzynarodową akredytację Recognition of Landscape Architecture Programme, nadawaną przez International Federation of Landscape Architecture Europe (IFLA Europe). Akredytacja została przyznana na lata 2023–2028.

Kierunek Budownictwo jest również corocznie wyróżniany

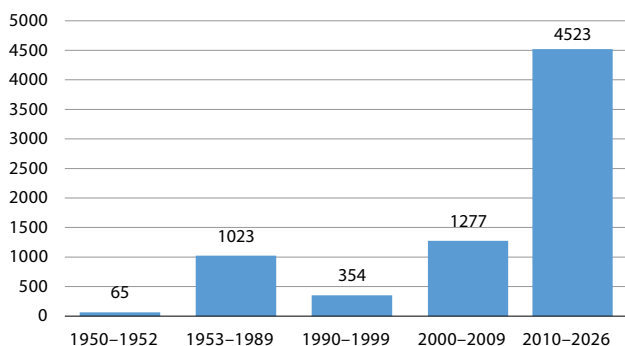
w prestiżowym BUILDER Ranking Education for the Future TOP10, a w latach 2019 i 2024 uzyskał 3 miejsca w gronie wydziałów politechnicznych kształcących na tym kierunku. W 2026 roku Wydział znalazł się również wśród pięciu nagrodzonych, które uzyskały Tytuł i Złotą Statuetkę TOPBUILDER 2026:



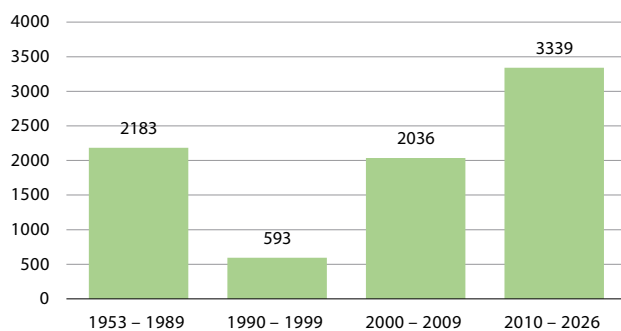
„za wysoki poziom kształcenia inżynierskiego, rozwój działalności naukowo-badawczej, skuteczne łączenie nauki z praktyką gospodarczą i potrzebami nowoczesnej gospodarki oraz rozwój szkolnictwa wyższego”.



W Centrum Wodnym SGGW 21 października 2025 roku w został zorganizowany Jubileusz 30-lecia kształcenia na kierunku Budownictwo na SGGW, pod patronatem m.in. Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego, Mazowieckiego Urzędu Marszałkowskiego, Polskiej Izby Inżynierów Budownictwa, oraz Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa, podczas którego wręczono pamiątkowe statuetki dwudziestu Prekursorom tego kierunku na SGGW oraz Srebrne Dyplomy pierwszym absolwentom z 2000 roku. Uczestnicy wyrazili uznanie dla rozwoju i poziomu kształcenia kadry inżynierskiej do branży budowlanej. Liczbę absolwentów studiów inżynierskich i magisterskich Wydziału w latach 1950–2026 przedstawiono na rysunkach 1 i 2, a na rysunkach 3 i 4 pokazano liczby absolwentów Wydziału



Rys. 1. Liczby absolwentów studiów inżynierskich Wydziału w latach 1950–2026



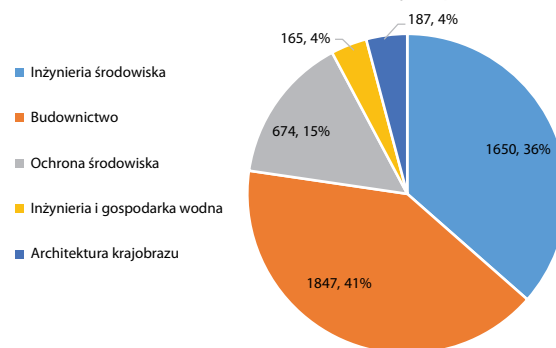
Rys. 2. Liczby absolwentów studiów magisterskich Wydziału w latach 1953–2026

na kierunkach studiów inżynierskich i magisterskich w latach 2010–2026.

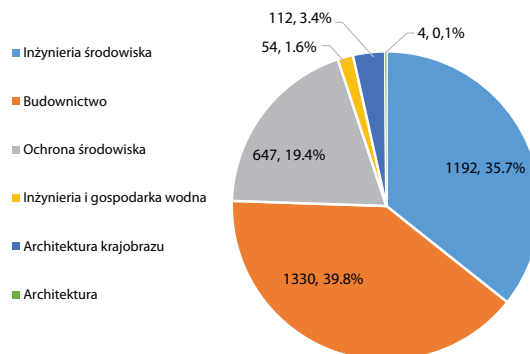
Dodatkowym obszarem działalności dydaktycznej Wydziału są studia podyplomowe. Aktualnie są powołane studia podyplomowe: „Projektowanie Geotechniczne”, „Budownictwo Drewniane”, „Budownictwo Energooszczędne, Audyt Energetyczny i Ocena Energetyczna Budynków”, „Zabezpieczenia Wodochronne Budynków”, „Budownictwo Zrównoważone”.

Władze i osoby zasłużone dla rozwoju Wydziału

Od początku istnienia Wydziału funkcję dziekana pełniło 21 profesorów w następujących latach: Stanisław Turczynowicz (1946–1951), Władysław Kollis (1951–1954), Jerzy Mandes (1954–1956), Kazimierz Dębski (1956–1960), Jerzy Ostromęcki (1960–1962), Stefan Białynicz (1962–1967), Ryszard Koronowski (1967–1968), Zygmunt Mikucki (1968–1970), Stefan Liwski (1970–1972), Wojciech Wolski (1972–1978), Jan Skibiński (1978–1981), Tadeusz Kiciński (1981–1987), Elżbieta Biernacka (1987–1990), Edward Pierzgalski (1990–1993), Tomasz Brandyk (1993–1999), Alojzy Szymański (1999–2002), Kazimierz Banasik (2002–2008), Jerzy Jeznach (2008–2016), Eugeniusz Koda (2016–2019), Mieczysław Połowski (2019–2020), Grzegorz Majewski (od 2020 roku) [7, 8]. Kilku profesorów Wydziału brało udział w bezpośrednim kierowaniu uczelnią. Profesor Alojzy Szymański pełnił funkcję rektora SGGW w okresie 2008–2016. Dziewięciu profesorów było



Rys. 3. Liczby absolwentów studiów inżynierskich na prowadzonych kierunkach na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska w latach 2010–2026



Rys. 4. Liczby absolwentów studiów magisterskich na prowadzonych kierunkach na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska w latach 2010–2026

prorektorami: Jerzy Mandes (1956–1959), Jerzy Ostromęcki (1962–1965), Stefan Liwski (1972–1981), Wojciech Wolski (1978–1984), Edward Pierzgalski (1993–1996), Elżbieta Biernacka (1996–2002), Alojzy Szymański (2002–2008), Kazimierz Banasik (2016–2020), Tomasz Okruszko (od 2020 roku).

Ważną rolę członków Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułu Naukowego pełnili profesorowie Tomasz Brandyk (2003–2009) i Jerzy Jeznach (2017–2020). Wielu pracowników Wydziału pełniło znaczące funkcje w kierowaniu komitetami, towarzystwami naukowymi i zawodowymi m.in. prof. Tomasz Brandyk – członek korespondent PAN, pełnił funkcję zastępcy przewodniczącego Wydziału V Nauk Rolniczych, Leśnych i Weterynaryjnych PAN. Funkcję przewodniczących Komitetu Melioracji i Inżynierii Środowiska Rolniczego PAN pełnili profesorowie Jerzy Ostromęcki, Józef Prończuk, Czesław Somorowski, Edward Pierzgalski i Jerzy Jeznach. Prof. Kazimierz Banasik pełnił funkcję Przewodniczącego Komitetu Inżynierii Środowiska PAN w kadencji 2020–2024. Prof. Tomasz Okruszko jest przewodniczącym Regionu Europy Środkowo-Wschodniej Global Water Partnership – organizacji pozarządowej o zasięgu globalnym, wdrażającej zintegrowane gospodarowanie zasobami wodnymi oraz członkiem komitetów redakcyjnych *Hydrological Sciences Journal* i *Ecohydrology and Hydrobiology*. Przewodniczy także Komitetowi Gospodarki Wodnej PAN. Zasiadał w radach naukowych czterech parków narodowych (Biebrzańskiego, Narwiańskiego, Słowińskiego oraz Kampinoskiego). W Biebrzańskim Parku Narodowym był przewodniczącym Rady (dwie kadencje). Pełnił i pełni obowiązki członka rad naukowych Instytutu Geofizyki PAN i Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej Państwowym Instytucie Badawczym. Prof. Janusz Kubrak był członkiem Rady Naukowej Instytutu Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku w latach 2002–2006, a w latach 2007–2010 członkiem Rady Naukowej Instytutu Geofizyki PAN w Warszawie. Prof. Jan Żelazo pełnił funkcje wiceprzewodniczącego Komitetu Gospodarki Wodnej PAN oraz był członkiem wielu krajowych Rad i Komitetów. Profesor Kazimierz Banasik był prezesem Stowarzyszenia Hydrologów Polskich oraz wiceprzewodniczącym Międzynarodowej Komisji Erozji Kontynentalnej IAHS (2011–2019), a prof. Zbigniew Lechowicz i prof. Alojzy Szymański pełnili funkcję Prezydenta Polskiego Komitetu Geotechniki. Prof. Eugeniusz Koda jest członkiem międzynarodowych towarzystw naukowych (ISSMGE, IGS, ISEG – Council Member), od 2021 roku członkiem Rady Naukowej Instytutu Badawczego Dróg i Mostów (w tym członkiem zespołu kwalifikacyjnego), członkiem Zespołu ds. Nagród Prezesa Rady Ministrów, oraz wieloletnim członkiem i przewodniczącym komisji kwalifikacyjnych nadających tytuły rzeczoznawców budowlanych i uprawnienia budowlane w MOiB i PIIB.

W uznaniu za zasługi dla Wydziału, Senat SGGW uhonorował zaszczytnym tytułem Doktora Honoris Causa kilku wybitnych profesorów. Tytuł ten otrzymali profesorowie: Jerzy Ostromęcki w 1986 roku, Janos J. Bogardi (1996 r.), Eugeniusz Dembicki (2003 r.), Hans Peter Nachtnebel (2006 r.), Desmond Eric Walling (2010 r.), Wojciech Wolski (2015 r.), Michele Jamiołkowski (2015 r.), Zbigniew

Kundzewicz (2018 r.) i Arthur Petrus Johannes Mol (2024 r.). Wyrazem wysokiej oceny osiągnięć było także nadanie tytułu Doktora Honoris Causa profesorom Wydziału przez inne uczelnie: Akademia Rolnicza we Wrocławiu uhonorowała tym tytułem profesorów: Aleksandra Maksimowa (1966 r.), Czesława Somorowskiego (2001 r.) i Tomasza Brandyka (2005 r.), a Słowacki Rolniczy Uniwersytet w Nitrze prof. Edwarda Pierzgalskiego (2014 r.).

Aktualna organizacja i działalność naukowa

Działalność naukowa na Wydziale od roku 2019 roku realizowana jest w instytutach. Instytutem Inżynierii Środowiska w roku 2019 kierował prof. dr hab. inż. Tomasz Okruszko, a od roku 2020 dyrektorem Instytutu Inżynierii Środowiska jest prof. dr hab. inż. Janusz Kubrak. Funkcję dyrektora Instytutu Inżynierii Łądowej od roku 2019 sprawuje prof. dr hab. inż. Eugeniusz Koda [7]. Instytut Inżynierii Środowiska w roku 2019 tworzyło siedem katedr. W wyniku przeprowadzonej w lutym 2025 roku konsolidacji, struktura Instytutu Inżynierii Środowiska została ograniczona do czterech katedr. Celem tych działań było zwiększenie integracji badań oraz efektywności zarządzania potencjałem naukowym. Nowo utworzona Katedra Architektury Krajobrazu kontynuuje działalność najstarszego w Polsce i jednego z pierwszych w Europie ośrodków kształcenia architektów krajobrazu na poziomie wyższym, która w 2019 roku obchodziła jubileusz 90-lecia. Kierownikiem Katedry jest dr hab. inż. Joanna Dudek-Klimiuk. Katedra Hydrauliki, Inżynierii Wodnej i Sanitarnej prowadzi badania nad hydrauliką koryt otwartych i budowli, systemami kanalizacyjnymi i wodociagowymi, technologiami oczyszczania wody i ścieków oraz hydrogeologią i geologią inżynierską, pod kierunkiem dr. hab. Adama Kiczko, prof. SGGW. Katedra Kształtowania Środowiska i Teledetekcji zajmuje się nowoczesnymi metodami teledetekcji i badaniami środowiskowymi pod kierownictwem prof. dr hab. Mai Radziemskiej. Katedra Hydrologii, Meteorologii i Gospodarki Wodnej prowadzi działalność w zakresie hydrologii, ochrony powietrza, agroklimatologii, bioklimatologii, modelowania procesów środowiskowych, analizy ryzyka i zagrożeń środowiskowych oraz systemów geoinformacyjnych i baz danych. Funkcję kierownika Katedry sprawuje dr hab. Mikołaj Piniewski, prof. SGGW. Pracownicy Instytutu Inżynierii Środowiska w latach 2019–2025 opracowali 8 patentów i zrealizowali 87 projektów naukowo-badawczych krajowych i międzynarodowych. Prof. dr hab. inż. Tomasz Okruszko kieruje projektem uzyskanym w ramach konkursu Horyzont 2020, dwoma projektami w ramach konkursu Horyzont Europa oraz programem Life19. Dr hab. Mikołaj Piniewski, prof. SGGW kieruje projektem z konkursu Horyzont 2020, projektem z konkursu Horyzont Europa, dwoma Projektami NCN Preludium i Preludium Bis, NCN Sonata, a także projektem uzyskanym w ramach Partnerstwa Water4all. Dr hab. Mateusz Grygoruk, prof. SGGW kieruje projektem Horyzont Europa, projektem MEIN oraz OPUS 25. Dr hab. inż. Beata Gawryszewska, prof. SGGW kieruje projektem otrzymanym w ramach konkursu Horyzont 2020 oraz NCN Opus 18. Dr hab. inż. Renata Giedych,

prof. SGGW kieruje projektem uzyskanym w ramach konkursu Horyzont Europa. Również dr hab. inż. Edyta Hewelke i dr Andrzej Brandyk kierują projektami uzyskanymi w ramach konkursu Horyzont Europa. Do ważnych osiągnięć Instytutu należą:

- zastosowanie nowoczesnych metod restytucji dolin rzecznych,
- opracowanie urządzeń pomiarowych i systemu monitoringu środowiska,
- opracowanie narzędzi wspierających zintegrowaną gospodarkę wodną w Europie,
- wprowadzenie długoterminowego monitoringu lasów wspierającego gospodarkę leśną,
- opracowanie gry komputerowej wspomagającej adaptację miast do zmian klimatu.

Wyniki badań Instytutu są wykorzystywane w kraju i za granicą, m.in. przez PGW Wody Polskie, administrację wodną Słowacji oraz Litewską Agencję Ochrony Środowiska. Pracownicy pełnią funkcje w komitetach i komisjach oraz zdobywają liczne nagrody, np. dr inż. Paweł Marcinkowski otrzymał stypendium dla wybitnych młodych naukowców w 2025 roku, prof. Tomasz Okruszko objął funkcję wiceprzewodniczącego Komitetu Nauk o Wodzie i Gospodarki Wodnej przy Prezydium PAN, a dr hab. Mikołaj Piniewski, prof. SGGW, uzyskał nagrodę STEM Impact Award 2024-25. Prof. Maja Radziemska i dr hab. Mikołaj Piniewski zostali wyróżnieni w rankingu World's Top 2% Scientists 2025 Stanford University/Elsevier.

Instytut Inżynierii Lądowej działa od 1 października 2019 roku. Początkowo składał się z czterech katedr. Od 1 stycznia 2025 roku, po przekształceniu czterech zakładów w katedry, Instytut liczy sześć katedr.

Katedra Geotechniki kontynuuje działalność w zakresie mechaniki gruntów i geotechniki. W przeszłości kierowali nią wybitni naukowcy: prof. Władysław Kollis, prof. Zygmunt Mikucki, prof. Wojciech Wolski i prof. Zbigniew Lechowicz, a także prof. Alojzy Szymański. Obecnym kierownikiem jest dr hab. inż. Wojciech Sas, prof. SGGW. Katedra Mechaniki Budowli prowadzi badania w zakresie wytrzymałości materiałów i mechaniki budowli. Wybitni mechanicy to prof. Jerzy Mandes, prof. Grzegorz Jemielita (też WIL PW), prof. Wiesław Nagórko, prof. Ewaryst Wierzbicki, prof. Monika Wągrowa i dr Roman Kamiński. Obecnie kierownikiem Katedry jest dr hab. inż. Paweł Ogrodnik, prof. SGGW. Katedra Inżynierii Budowlanej, pod kierownictwem dr. hab. inż. Mariusza Żółtowskiego, prof. SGGW, zajmuje się materiałami budowlanymi, optymalizacją projektowania, diagnostyką konstrukcji i technologiami komputerowymi. Wybitni konstruktorzy pracujący w tym obszarze to: prof. Jan Lenard, prof. Wacław Jędrzejewski, prof. Faustyn Szlęzak, prof. Lesław Brunarski (też ITB), prof. Michał Knauff (też WIL PW) i prof. Wojciech Żółtowski (też WIL PW). Katedra Hydrotechniki, Technologii i Organizacji Robót koncentruje się na innowacyjnych rozwiązaniach technologicznych, organizacyjnych i materiałowych w budownictwie wodnym. Badania prowadzone w tym obszarze rozwijał prof. Janusz Sokołowski i prof. Mieczysław Połoński. Obecnie kierownikiem jest dr hab. Roman Tracz, prof. SGGW. Katedra Budownictwa Zrównoważonego i Geodezji, utworzona w 2025

roku, bada zagadnienia geotechniki środowiskowej, rekultywacji terenów zdegradowanych, geodezji i teledetekcji, zrównoważonego budownictwa i architektury. Wybitnymi pracownikami naukowymi z licznymi wdrożeniami z tego zakresu są: prof. Eugeniusz Koda i prof. Magdalena Daria Vaverková. Kierownikiem jest dr hab. inż. Anna Podlasek, prof. SGGW. Katedra Architektury, powołana w 2025 roku dla potrzeby kierunku Architektura, prowadzi badania interdyscyplinarne obejmujące architekturę prośrodowiskową, teorię architektury i studia miejskie. W Katedrze zatrudnieni są architekci posiadający uprawnienia budowlane i znaczący dorobek projektowy z wcześniejszej działalności, są laureatami konkursów i nagród architektonicznych. Kierownikiem Katedry jest dr hab. inż. arch. Agnieszka Starzyk, prof. SGGW. Badania koncentrują się na zrównoważonym projektowaniu, cyfrowym prototypowaniu, wdrażaniu technologii BIM, parametrycznym modelowaniu oraz architekturze drewnianej w skali budynku i miasta. W 2026 roku zarządzeniem rektora SGGW zostało utworzone Centrum Drewna i Konstrukcji Drewnianych (CDiKD), którego celem jest tworzenie spójnego i przejrzystego prawa, które umożliwi rozwój budownictwa drewnianego w zgodzie z europejskimi normami i wypracowanymi już poza Polską standardami. Inicjatorami powstania CDiKD były Instytut Inżynierii Lądowej SGGW, Instytut Nauk Drzewnych i Meblarstwa SGGW, Instytut Techniki Budowlanej oraz Stowarzyszenie Energooszczędne Domy Gotowe. Przedsięwzięcie uzyskało patronat Ministerstwa Rozwoju i Technologii. CDiKD prowadzi działalność naukowo-edukacyjno-legislacyjną, badawczą i szkoleniową. Od 2019 do 2025 roku w Instytucie Inżynierii Lądowej uzyskano 10 patentów i zrealizowano około 50 projektów naukowo-badawczych krajowych i międzynarodowych. Aktualnie pracownicy Instytutu realizują 6 projektów finansowanych z funduszy Narodowego Centrum Nauki i kilka projektów badawczych międzynarodowych. Wykonano również kilkadziesiąt dokumentacji technicznych, od zleceńodawców krajowych i zagranicznych. Ważne osiągnięcia obejmują:

- nowoczesne metody stabilizacji gruntów antropogenicznych – geopolimeryzacja,
- pilotażowe ekspertyzy sanitarne i geotechniczne dla farm fotowoltaicznych na składowiskach odpadów,
- modele uczenia maszynowego do wykrywania defektów konstrukcji i mostów,
- badania nad architekturą obiegu zamkniętego i drewnianą architekturą zrównoważoną,
- technologie BIM, modelowanie parametryczne, druk 3D, diagnostyka drganiowa, izolacje hydro- i termoizolacyjne.

Osiągnięcia Instytutu są wdrażane w Polsce i za granicą, np. przez PRO-INŻ, Miejskie Przedsiębiorstwo Oczyszczania w m.st. Warszawie, University of Lisbon, University of Niš oraz SAXON LOOMIS Consulting Group w USA. Przykłady obejmują projekty farm fotowoltaicznych na składowiskach, systemy wzmacniania podłoża, recykling odpadów, technologie zrównoważonego budownictwa oraz ekspertyzy konstrukcyjne i materiałowe. W 2025 roku zespół Instytutu Inżynierii Lądowej (wspólnie z REMEA Sp. z o.o. jako liderem), w wyniku

przetargu publicznego został wyłoniony do przeprowadzenia badań, modelowania i opracowania koncepcji zabezpieczenia trzech (ZACHEM w Bydgoszczy, BORUTA w Zgierzu i WISTOM w Tomaszowie Mazowieckim) wielkoobszarowych terenów zdegradowanych, wyznaczonych do rekultywacji na mocy Ustawy z 2023 roku o wielkoobszarowych terenach zdegradowanych (Dz.U. poz. 1719), co stanowi uznanie kompetencji i doświadczenia w zakresie rekultywacji składowisk i terenów przemysłowych.

Prestiżowe wyróżnienia uzyskało wielu naukowców Instytutu, m.in.: prof. dr hab. inż. Magdalena Daria Vaverková i prof. dr hab. inż. Eugeniusz Koda zostali wyróżnieni w rankingu World's Top 2% Scientists 2025 Stanford University/Elsevier. Pracownicy Instytutu uzyskują stypendia na topowych uniwersytetach światowych z Kościuszko Foundation i Fulbright Foundation, które przyznano m.in. dla prof. dr hab. inż. Magdaleny Darii Vaverkovej (na Stanford University), dr inż. Aleksandry Jakimiuk (na Stanford University), mgr inż. arch. Małgorzaty Kurcusz-Gzowskiej (na Berkeley University) i dr inż. Andrzeja Głuchowskiego (na New York University), który w 2026 roku uzyskał również prestiżowe stypendium Fundacji Mieczysława Bekera. Stypendium z Fundacji Bekera w 2026 roku uzyskała również mgr inż. arch. Małgorzata Kurcusz-Gzowska. W 2025 roku staż naukowy na Sorbona University w Paryżu odbyła dr inż. arch. Joanna Koszewska, uzyskując stypendium rządu Francji, a dr inż. arch. Anna Piętocha od kilku lat prowadzi cykliczne zajęcia na Zhengzhou University of Aeronautics (Chiny). Instytut współpracuje m.in. z Okayama University (Japonia), gdzie staże badawcze odbyły prof. Magdalena Daria Vaverková i dr inż. Aleksandra Jakimiuk. Aktualnie studia doktoranckie odbywa tam mgr inż. arch. Maja Sutkowska, która uzyskała stypendium rządu Japonii. Długoterminowe staże badawcze w Hanoi University of Mining and Geology (Wietnam) i University of New South Wales (Sydney, Australia) odbył dr inż. Piotr Osiński. Zagraniczne staże badawcze odbyło też kilkunastu doktorantów i pracowników Instytutu w ramach Własnego Funduszu Stypendialnego ze środków JM rektora SGGW. Długoterminowe staże w Instytucie Inżynierii Lądowej z programu NAWA Ułam uzyskało dwóch młodych naukowców z Indii, dr inż. Arvindan Sivasuriyan i dr inż. Parthiban Devarajan oraz prof. Katarzyna Apolinarzski z California State University (San Francisco, USA). Instytut przyjmuje wielu stażystów z politechnicznych ośrodków krajowych i zagranicznych oraz profesorów wizytujących.

W 2025 roku Nagrodę Zespołową Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za działalność naukową uzyskał Zespół prof. Eugeniusza Kody, prof. Magdaleny Darii Vaverkovej, dr hab. Anny Podlasek, dr Anny Markiewicz, dr Piotra Osińskiego i dr Aleksandry Jakimiuk. Prof. Eugeniusz Koda w 2020 roku uzyskał Nagrodę PZITB im. Aleksandra Dyżewskiego, w 2025 roku tytuł Ambadora Kongresów Polskich, a w 2026 roku został laureatem prestiżowej nagrody Polski Herkules 2025, przyznawanej osobom, które w wyjątkowy sposób przyczyniają się do rozwoju polskiego budownictwa, architektury i infrastruktury, oraz za zaangażowanie w rozwój uczelni i środowiska akademickiego.



3–6 lipca 2024 r. Instytut Inżynierii Lądowej był organizatorem cyklicznej konferencji międzynarodowej 5th Environmental Geotechnology, Recycled Waste Materials, and Sustainable Engineering (EGRWSE-2024), w której uczestniczyło około 200 osób, w tym ponad 120 uczestników z zagranicy i władze International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE), Prezydent dr Marc Ballouz i Vice-Prezydent Europe prof. Lyessie Laloui. Efektem konferencji były również 4 monografie opublikowane przez wydawnictwo Springer.

Osiągnięcia naukowo-badawcze Instytutu Inżynierii Lądowej są wykorzystywane i cytowane przez liczne ośrodki gospodarcze i badawcze w kraju i za granicą.

Działalność instytutów wskazuje na wyraźną ewolucję Wydziału od klasycznej melioracji wodnej do nowoczesnej, interdyscyplinarnej inżynierii środowiska, budownictwa i architektury, w której integruje się nauki przyrodnicze, techniczne oraz technologie cyfrowe w celu rozwiązywania złożonych problemów współczesnej cywilizacji. Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska SGGW pozostaje wiodącym ośrodkiem kształcenia, badań naukowych i innowacji w Polsce, łącząc tradycję melioracji i inżynierii wodnej z nowoczesną architekturą i urbanistyką, inżynierią środowiska i zrównoważonym budownictwem.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Borończyk-Płaska G., Zobel H. (red.), 100-lecie Odnowienia Tradycji Wydziału Inżynierii Lądowej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2015
- [2] Kollis W., Historia Wydziału Melioracji Wodnych, [w:] Księga Pamiątkowa Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego 1906–1956, Wydawnictwo SGGW, 1958, str. 158–163
- [3] Ostromecki J., Zarys działalności Wydziału Melioracji Wodnych w latach 1946–1977. Zeszyty Naukowe SGGW-AR, Mel. Rol. 17, 1978, str. 5–15
- [4] Sokołowski J. (red.), Kronika Jubileuszowa – 50-lecie Wydziału Melioracji i Inżynierii Środowiska SGGW, Wydawnictwo SGGW, 1996
- [5] Jeznach J., Pierzgałski E., Urbański J., Żelazo J. (red.), Kronika Jubileuszowa – 70-lecie Studiów na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska SGGW, Wydawnictwo SGGW, 2016
- [6] Jeznach J., Koda E., Skutnik Z., Hewelke P., Urbański J., 70 lat Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska SGGW, Inżynieria i Budownictwo 4/2016, str. 175–180
- [7] Koda E., Od Melioracji Rolnych do Budownictwa. Rys historyczny z okazji 70-lecia Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska oraz 200-lecia Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Acta Sci. Pol. Architectura 15(4)2016, str. 5–16
- [8] Koda E., Od Melioracji do Budownictwa i Architektury. Rys historyczny z okazji jubileuszu 30-lecia utworzenia kierunku Budownictwa na SGGW, Inżynieria i Budownictwo 5/2025, str. 477–483

Budownictwo w gospodarce o obiegu zamkniętym w ujęciu cyklu życia obiektu

Construction in the circular economy from a building life cycle perspective

prof. dr hab. inż. Magdalena Daria Vaverková (ORCID: 0000-0002-2384-6207), prof. dr hab. inż. Eugeniusz Koda (ORCID: 0000-0002-3895-960X), dr hab. inż. Anna Podlasek, prof. SGGW (ORCID: 0000-0003-0326-5672), Instytut Inżynierii Ładowej, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7954

Streszczenie: Budownictwo należy do sektorów o największym zużyciu zasobów naturalnych oraz znaczącym udziale w generowaniu odpadów i emisji, co uzasadnia konieczność wdrażania zasad gospodarki o obiegu zamkniętym w całym cyklu życia obiektów budowlanych. Celem artykułu jest przegląd rozwiązań służących zwiększaniu cyrkularności na etapach planowania i projektowania, realizacji, eksploatacji oraz zaprzestania eksploatacji i rozbiórki budynków, a także wskazanie ich znaczenia dla ograniczenia presji środowiskowej sektora budowlanego. Omówiono kluczowe założenia gospodarki o obiegu zamkniętym w budownictwie, koncepcję budynku cyrkularnego oraz podejście oparte na cyklu życia obiektu jako podstawę oceny rozwiązań materiałowych, technologicznych i organizacyjnych. Zwrócono uwagę na rolę projektowania cyrkularnego, doboru materiałów umożliwiających ponowne wykorzystanie, efektywnego zarządzania procesem budowlanym oraz działań eksploatacyjnych wydłużających okres użytkowania obiektów budowlanych. Szczególne znaczenie przypisano etapowi zaprzestania eksploatacji i rozbiórki, który w podejściu cyrkularnym stanowi źródło wtórnych zasobów materiałowych. Wyniki przeglądu wskazują, że skuteczne wdrażanie zasad gospodarki o obiegu zamkniętym w budownictwie wymaga podejścia systemowego, współpracy interesariuszy oraz uwzględniania aspektów środowiskowych już na wczesnych etapach procesu inwestycyjnego, co ma istotne znaczenie dla ograniczania zużycia zasobów, emisji oraz ilości odpadów budowlanych. Artykuł ma charakter przeglądowy i systematyzuje rozwiązania cyrkularne w budownictwie według etapów cyklu życia obiektu.

Słowa kluczowe: budownictwo, gospodarka o obiegu zamkniętym, budynek cyrkularny, cykl życia budynku, odpady budowlane.

Abstract: Construction is one of the sectors with the highest consumption of natural resources and a significant contribution to waste generation and emissions, which justifies implementing circular economy principles across the entire life cycle of buildings. This article reviews methods for increasing circularity at the planning and design, construction, operation, and decommissioning stages and highlights their importance for reducing the environmental pressures of the construction sector. The paper discusses key circular economy principles in construction, the concept of a circular building, and the life cycle approach as a basis for assessing material, technological, and organizational solutions. Attention is given to circular design, the selection of materials that enable reuse, effective management of construction processes, and operational measures that extend service life. Emphasis is placed on the decommissioning stage, which in a circular approach can serve as a source of secondary material resources. The review indicates that effective implementation of circular economy principles in construction requires a systemic approach, stakeholder cooperation, and the integration of environmental considerations at early stages of the investment process, which is essential for reducing resource consumption, emissions, and the amount of construction waste. The article is a review that organizes circular solutions in construction by life cycle stage.

Keywords: construction, circular economy, circular building, building life cycle, construction waste.

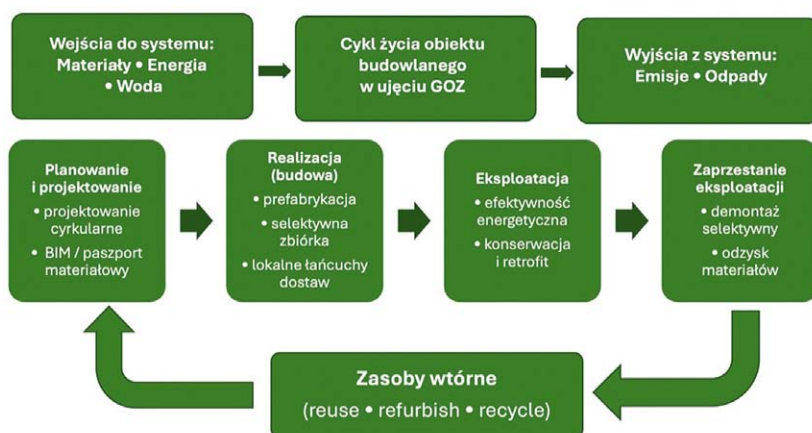
1. Wprowadzenie

Współczesne budownictwo coraz częściej postrzegane jest jako sektor wymagający głębokiej transformacji w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ), rozumianej jako odejście od liniowego modelu gospodarowania zasobami na rzecz rozwiązań ukierunkowanych na efektywność materiałową, redukcję odpadów oraz wydłużanie cyklu życia obiektów budo-

wlanych [1, 2]. W literaturze przedmiotu podkreśla się, że wdrażanie zasad GOZ w środowisku zabudowanym stanowi jeden z kluczowych elementów zrównoważonego rozwoju i obejmuje etap projektowania, realizacji, eksploatacji oraz końcowy etap cyklu życia budynków [2].

Podejście to ukierunkowane jest na ochronę zasobów naturalnych, ograniczenie zużycia energii pochodzącej z nieodnawialnych źródeł oraz redukcję strumieni odpadów generowanych przez

Rys. 1. Granice systemu oraz przepływy zasobów i oddziaływań środowiskowych w cyklu życia obiektu budowlanego w ujęciu GOZ (opracowanie własne)



sektor budowlany, który należy do najbardziej zasobochłonnych gałęzi gospodarki [3]. Badania wskazują, że zastosowanie strategii GOZ w środowisku zabudowanym może znacząco zmniejszać presję na zasoby poprzez poprawę efektywności materiałowej i energetycznej oraz wdrażanie rozwiązań organizacyjnych i technologicznych wspierających cyrkularność procesów inwestycyjnych [1, 3].

Aktualny stan badań dowodzi, że skuteczne wdrażanie GOZ w budownictwie wymaga podejścia wielopoziomowego, obejmującego skalę materiałową, budynkową oraz urbanistyczną, a także uwzględnienia relacji pomiędzy interesariuszami w całym łańcuchu wartości [2]. Szczególną rolę przypisuje się projektowaniu cyrkularnemu, doborowi materiałów umożliwiających naprawę, odnowę (konserwację) lub wymianę elementów budynku oraz stosowaniu narzędzi wspomagających, takich jak cyfrowe modele informacji o budynku (BIM), które pozwalają integrować aspekty środowiskowe, funkcjonalne i organizacyjne na wszystkich etapach cyklu życia obiektu [2].

Transformacja sektora architektury, inżynierii i budownictwa w kierunku GOZ napotyka liczne bariery o charakterze organizacyjnym, technologicznym i społecznym. Analizy praktyk projektowych i realizacyjnych pokazują, że często istnieją rozbieżności pomiędzy deklarowanymi celami cyrkularnymi a rzeczywistymi działaniami na poziomie projektów, w szczególności w zakresie wykorzystania surowców wtórnych oraz postrzegania ich jakości, estetyki i bezpieczeństwa [4]. Wskazuje się również na ograniczenia wynikające z procedur administracyjnych oraz krótkich horyzontów decyzyjnych, które utrudniają wdrażanie elastycznych i adaptacyjnych rozwiązań projektowych [5]. W świetle powyższego budownictwo w podejściu GOZ powinno być postrzegane nie tylko jako zbiór rozwiązań technologicznych, lecz jako kompleksowe podejście integrujące projektowanie, zarządzanie, relacje interesariuszy oraz ramy instytucjonalne. Rozwój badań przeglądowych oraz analiz systematycznych umożliwia identyfikację najbardziej efektywnych strategii i narzędzi wspierających cyrkularność w środowisku zabudowanym, a także wskazuje kierunki dalszych działań badawczych i wdrożeniowych [1, 2]. Celem opracowania jest przegląd zasad zwiększania cyrkularności w cyklu życia budynku oraz wskazanie ich znaczenia dla ograniczenia zużycia zasobów, emisji i ilości odpadów (rys. 1).

2. Metodyka przeglądu literatury

Niniejsze opracowanie ma charakter przeglądowy i opiera się na analizie literatury naukowej, raportów branżowych oraz

danych statystycznych dotyczących gospodarki o obiegu zamkniętym w budownictwie. Przeglądu dokonano na podstawie publikacji indeksowanych w bazach Scopus, Web of Science oraz Google Scholar, a także dokumentów instytucjonalnych (m.in. GUS, IEA, Circle Economy). Wyszukiwanie prowadzono z wykorzystaniem słów kluczowych, takich jak: *circular economy, construction sector, building life cycle, circular building, construction and demolition waste* oraz *life cycle assessment*. Do analizy wybrano publikacje dotyczące rozwiązań cyrkularnych na etapach planowania, realizacji, eksploatacji i zakończenia użytkowania obiektów budowlanych. Wyselekcjonowane źródła poddano analizie jakościowej i usystematyzowano według etapów cyklu życia obiektu.

3. Uwarunkowania środowiskowe funkcjonowania sektora budowlanego w Polsce

W Polsce obserwuje się systematyczny wzrost wiedzy i świadomości w zakresie zmian klimatu, ochrony środowiska oraz zasad zrównoważonego rozwoju, co potwierdzają zarówno badania empiryczne dotyczące postaw społecznych, jak i analizy przemian społeczno-ekonomicznych w okresie postsojalistycznym [6, 7]. Jednocześnie wskazuje się na potrzebę ograniczania nie tylko strumieni odpadów, lecz także nadmiernej eksploatacji surowców naturalnych oraz wysokiej energochłonności procesów realizowanych w sektorze budowlanym [8, 9].

Stosowanie odnawialnych źródeł energii w budynkach oraz integracja systemów magazynowania energii mogą przyczyniać się do ograniczenia kosztów eksploatacyjnych i emisji, co ma szczególne znaczenie w kontekście transformacji energetycznej w Polsce [10, 11]. Równocześnie oszczędne gospodarowanie wodą oraz poprawa retencji na terenach zurbanizowanych są istotne z perspektywy nasilających się zjawisk opadowych, przeciążeń systemów odwodnienia oraz odporności miast na zmiany klimatu [12]. Ograniczenie transportu materiałów budowlanych oraz optymalizacja logistyki placów budowy mają znaczenie ze względu na udział tych procesów w emisjach oraz ich wpływ na organizację robót budowlanych [13, 14].

Sektor budowlany w skali globalnej charakteryzuje się istotnym udziałem w wydobywaniu surowców naturalnych oraz emisji dwutlenku węgla, przy czym znaczna część emisji związana jest z produkcją materiałów budowlanych i wyrobów stosowanych w procesie realizacji obiektów oraz z ich transportem [15]. Wzrost liczby ludności oraz postępująca urbanizacja prowadzą do zwiększenia presji na systemy energetyczne i materiałowe, a prognozy wskazują na dalszy wzrost udziału ludności miejskiej w populacji globalnej do 2050 r. [16].

W Polsce w 2022 r. wytworzono łącznie 115 039 tys. ton odpadów, z czego sektor budownictwa odpowiadał za 12 018 tys. ton, przy udziale odzysku na poziomie 9532 tys. ton [17]. Jednocześnie poziom cyrkularności gospodarki w Polsce szacowany jest na 10,2%, a jedynie około 10% wykorzystywanych surowców mineralnych stanowią surowce wtórne, według raportu Circularity Gap Report Poland, co wskazuje na dominację zasobów pierwotnych oraz wysoką presję materiałową [18]. W tym kontekście sektor budowlany wykazuje istotny potencjał wdrażania zasad gospodarki o obiegu zamkniętym, między innymi poprzez wydłużanie cyklu życia obiektów, naprawy, modernizacje, rozbudowy oraz ponowne wykorzystanie elementów konstrukcyjnych i materiałowych, jak również wykorzystanie materiałów antropogenicznych powstających w innych sektorach gospodarki (np. popioły i żużle z energetyki konwencjonalnej).

4. Zrównoważony rozwój miast jako kontekst transformacji sektora budowlanego

Rozwój miast oraz postępująca urbanizacja generują rosnące wymagania w zakresie technologii, planowania przestrzennego oraz zarządzania zasobami naturalnymi i energetycznymi. Współczesne koncepcje rozwoju miejskiego koncentrują się na poprawie jakości życia mieszkańców, efektywnym gospodarowaniu zasobami, ograniczaniu presji środowiskowej oraz adaptacji miast do skutków zmian klimatu [19]. W tym kontekście szczególne znaczenie przypisuje się integracji działań infrastrukturalnych, środowiskowych i społecznych, które umożliwiają długofalowe zwiększanie odporności systemów miejskich. Ramy działań w wymiarze globalnym wyznaczają cele zrównoważonego rozwoju przyjęte przez Organizację Narodów Zjednoczonych (ONZ), które stanowią punkt odniesienia dla polityk miejskich, planowania przestrzennego oraz rozwoju infrastruktury. Realizacja tych celów w miastach wymaga odejścia od sektorowego podejścia do zarządzania na rzecz rozwiązań systemowych, uwzględniających powiązania pomiędzy środowiskiem zabudowanym, gospodarką zasobami oraz zachowaniami użytkowników [19].

Z perspektywy sektora budowlanego koncepcja zrównoważonego rozwoju miast stanowi istotne tło dla wdrażania zasad GOZ, ponieważ decyzje dotyczące lokalizacji inwestycji, intensywności zabudowy, infrastruktury technicznej oraz sposobu użytkowania obiektów wpływają na możliwości ograniczania zużycia zasobów, emisji i ilości odpadów w całym cyklu życia budynków. Tym samym budownictwo cyrkularne wpisuje się

w szerszy paradygmat zrównoważonego rozwoju miast, wspierając realizację celów środowiskowych i społecznych na poziomie lokalnym i regionalnym.

5. Gospodarka o obiegu zamkniętym w budownictwie

Model liniowy gospodarki opiera się na schemacie „weź, wykończ, wyrzuć”, w którym surowce są pozyskiwane, przetwarzane, a następnie usuwane bez podejmowania działań ukierunkowanych na ich odzysk lub ponowne wykorzystanie, bez uwzględniania dalszego losu zużytych materiałów. Takie podejście prowadzi do wzrostu strumienia odpadów oraz utrwalania praktyk spalania i składowania, a w konsekwencji do nasilania presji na zasoby naturalne i środowisko. W odpowiedzi na te wyzwania została rozwinięta koncepcja GOZ, która zawiera liczne definicje w literaturze i jest szeroko omawiana zarówno w badaniach naukowych, jak i dokumentach strategicznych, w szczególności w kontekście sektora budowlanego [1, 2]. W ujęciu strategicznym GOZ definiowana jest jako model rozwoju gospodarczego ukierunkowany na maksymalizację wykorzystania wartości zasobów w całym cyklu życia produktów oraz minimalizację ilości wytwarzanych odpadów poprzez ich ponowne użycie, naprawę, przetwarzanie i recykling, zgodnie z hierarchią postępowania z odpadami [20]. W podejściu cyrkularnym szczególny nacisk kładzie się na wydłużanie cyklu życia produktów i obiektów budowlanych, przy jednoczesnym zachowaniu wymaganych parametrów technicznych, funkcjonalnych i bezpieczeństwa, co odróżnia GOZ od tradycyjnych praktyk gospodarki odpadami, koncentrujących się głównie na końcowej fazie użytkowania [2].

Hierarchia działań w GOZ często opisywana jest za pomocą modelu 3R (reduce, reuse, recycle), który stanowi podstawę podejścia cyrkularnego. Jednocześnie w literaturze przedmiotu wskazuje się na potrzebę szerszego ujęcia strategii utrzymania wartości zasobów, obejmującego działania takie jak naprawa, modernizacja, adaptacja, ponowne wykorzystanie elementów oraz wydłużanie okresu użytkowania obiektów. Takie rozszerzone podejście umożliwia bardziej kompleksowe wdrażanie zasad GOZ w budownictwie, szczególnie w odniesieniu do istniejących obiektów oraz działań modernizacyjnych [2, 21]. Zastosowanie zasad GOZ w sektorze budowlanym wymaga zmian na każdym etapie cyklu życia obiektu, począwszy od projektowania, poprzez realizację i eksploatację, aż po fazę końcową cyklu życia obiektu. Szczególną rolę przypisuje się modernizacjom i działaniom typu retrofit, które umożliwiają ograniczenie zużycia nowych materiałów, redukcję emisji oraz zachowanie istniejących zasobów materiałowych budynku, co jest zgodne z globalnymi praktykami zrównoważonego budownictwa [21]. Badania wskazują również na znaczenie narzędzi oceny cyklu życia, takich jak analiza cyklu życia (LCA), które pozwalają na ilościową ocenę efektów środowiskowych rozwiązań cyrkularnych i wspierają podejmowanie decyzji projektowych w budownictwie [22].

W literaturze podkreśla się, że skuteczne wdrażanie GOZ w budownictwie wymaga nie tylko rozwiązań technologicznych, lecz także zmian organizacyjnych i instytucjonalnych, obejmujących współpracę interesariuszy, dostosowanie procesów decyzyjnych oraz integrację podejścia cyrkularnego z politykami publicznymi i strategiami rozwoju [1, 4, 5]. W tym kontekście porównanie modelu liniowego i cyrkularnego w budownictwie wskazuje na istotny potencjał GOZ w ograniczaniu presji materiałowej, emisji oraz ilości odpadów, przy jednoczesnym zwiększaniu efektywności wykorzystania zasobów naturalnych i energii.

6. Zrównoważone budownictwo a budynek cyrkularny

Budynki projektowane w modelu liniowym charakteryzują się zazwyczaj wyższym zużyciem zasobów oraz większą ilością wytwarzanych odpadów w porównaniu z obiektami powstającymi w podejściu zrównoważonym i cyrkularnym [1, 15]. W odpowiedzi na te wyzwania w praktyce projektowej rozwijana jest koncepcja budynku cyrkularnego, stanowiąca rozwinięcie idei zrównoważonego budownictwa w kierunku pełniejszego uwzględnienia cyklu życia obiektu.

Budynek cyrkularny definiuje się jako obiekt, który na wszystkich etapach cyklu życia, od koncepcji i projektowania, przez realizację i eksploatację, aż po fazę zaprzestania eksploatacji, spełnia założenia GOZ, w szczególności w zakresie efektywnego wykorzystania zasobów, minimalizacji odpadów oraz możliwości ponownego użycia materiałów budowlanych i elementów konstrukcyjnych [2, 4, 5]. W odróżnieniu od klasycznych koncepcji zrównoważonego budownictwa podejście cyrkularne kładzie większy nacisk na zachowanie wartości materiałowej i funkcjonalnej obiektu w długim horyzoncie czasowym. W celu ułatwienia napraw, modernizacji i adaptacji obiektów stosuje się podejście warstwowe, w którym poszczególne elementy budynku charakteryzują się zróżnicowanym okresem trwałości, a ich wymiana stanowi naturalny element cyklu życia obiektu. Z perspektywy cyrkularności kluczowe jest projektowanie warstw o krótszym cyklu wymiany w sposób umożliwiający ich demontaż, naprawę i ponowne wykorzystanie, co sprzyja ograniczeniu strumienia odpadów oraz zwiększaniu elastyczności funkcjonalnej budynków [4, 5, 23]. Tak rozumiany budynek cyrkularny stanowi punkt wyjścia do analizy cyklu życia obiektu, w której decyzje projektowe, materiałowe i organizacyjne podejmowane na wczesnych etapach determinują możliwości wdrażania zasad gospodarki o obiegu

zamkniętym w fazie realizacji, eksploatacji oraz zakończenia użytkowania oraz rozbiórki.

7. Cykl życia budynku cyrkularnego

Cykl życia budynku cyrkularnego obejmuje etap planowania i projektowania, realizacji, eksploatacji oraz etap zaprzestania eksploatacji. W ujęciu systemowym podkreśla się konieczność traktowania cyklu życia jako spójnej całości, ponieważ rozdzielne analizowanie poszczególnych etapów może prowadzić do ograniczenia efektów środowiskowych i funkcjonalnych wynikających z zastosowania zasad zrównoważonego i cyrkularnego budownictwa [24, 25]. Badania wskazują, że decyzje podejmowane na wczesnym etapie planowania i projektowania mają kluczowe znaczenie dla późniejszych możliwości ograniczania zużycia zasobów, emisji oraz ilości odpadów w całym cyklu życia obiektu.

Na etapie planowania i projektowania określone są podstawowe parametry techniczne budynku, w tym rozwiązania konstrukcyjne, funkcjonalne i instalacyjne, a także przyjmowane są założenia dotyczące trwałości, elastyczności oraz możliwości adaptacji obiektu. Istotną rolę odgrywa tu stosowanie koncepcji „budynków zielonych” oraz narzędzi cyfrowych wspierających proces projektowy, które pozwalają ograniczać ryzyko błędów i integrować aspekty środowiskowe, techniczne i organizacyjne już na etapie koncepcji. W kolejnych fazach cyklu życia szczególne znaczenie ma dobór materiałów odnawialnych i pochodzących z recyklingu oraz stosowanie rozwiązań technicznych sprzyjających oszczędności materiałowej i ograniczaniu emisji związanych z realizacją obiektu [26].

Etap eksploatacji obejmuje działania ukierunkowane na redukcję zużycia energii i wody, utrzymanie wysokiej sprawności technicznej obiektu oraz prowadzenie regularnych prac konserwacyjnych. Działania te przyczyniają się do wydłużenia okresu użytkowania budynku, ograniczenia potrzeby przedwczesnych

Strategie zwiększania cyrkularności (GOZ) w cyklu życia obiektu budowlanego

Planowanie i projektowanie

Ocena zasadności nowej inwestycji
Projektowanie do demontażu
Elastyczność i adaptowalność funkcji
Materiały odnawialne i z recyklingu
BIM, paszport materiałowy, LCA

Budowa (realizacja)

Minimalizacja strat materiałowych
Lokalne łańcuchy dostaw
Selektywna zbiórka odpadów
Prefabrykacja i standaryzacja
Zwroty i ponowne użycie materiałów

Eksploatacja (użytkowanie)

Redukcja zużycia energii i wody
Konserwacja i utrzymanie
Modernizacje i naprawy
Komfort i bezpieczeństwo
Segregacja odpadów użytkownika

Zaprzestanie eksploatacji

Inwentaryzacja materiałowa
Uporządkowany demontaż
Selekcja elementów do ponownego użycia
Recykling jakościowy
Wprowadzenie zasobów wtórnych do obiegu

Rys. 2. Strategie zwiększania cyrkularności w cyklu życia obiektu budowlanego w ujęciu GOZ (opracowanie własne)

modernizacji oraz zmniejszenia oddziaływań środowiskowych w długim horyzoncie czasowym.

Końcowy etap cyklu życia obejmuje zakończenie eksploatacji oraz rozbiorę lub demontaż obiektu, prowadzone w sposób umożliwiający maksymalizację odzysku materiałów i ich ponowne wprowadzenie do obiegu gospodarczego. W podejściu cyrkularnym etap ten nie jest traktowany jako faza końcowa w sensie liniowym, lecz jako element zamykający cykl materiałowy i stanowiący źródło wtórnych zasobów do ponownego wykorzystania, co ma kluczowe znaczenie dla ograniczania zapotrzebowania na surowce pierwotne [24, 25]. Zestawienie kluczowych strategii zwiększania cyrkularności w poszczególnych etapach cyklu życia obiektu przedstawiono na rysunku 2.

8. Metody zwiększania cyrkularności na etapie planowania i projektowania

Etapy planowania i projektowania w sposób zasadniczy determinują rozwiązania techniczne, organizacyjne oraz środowiskowe wdrażane na dalszych etapach cyklu życia obiektu. W literaturze podkreśla się, że decyzje podejmowane na tym etapie mają największy wpływ na poziom zużycia zasobów, możliwości adaptacji budynku oraz potencjał odzysku materiałów po zakończeniu okresu użytkowania [2]. Z tego względu projektowanie stanowi kluczowy moment wdrażania zasad GOZ w budownictwie.

Na etapie planowania szczególne znaczenie ma krytyczna ocena zasadności realizacji nowej inwestycji oraz możliwość wykorzystania istniejących zasobów materiałowych obiektu zamiast wznoszenia nowych obiektów. Maksymalne wykorzystanie istniejących budynków i ich konstrukcji, odpowiedni wybór lokalizacji zapewniającej dostęp do infrastruktury technicznej oraz transportowej, a także uwzględnienie przyszłych potrzeb użytkowych sprzyjają ograniczaniu zużycia zasobów i emisji już na wczesnym etapie procesu inwestycyjnego [1, 4, 5].

Na etapie projektowania kluczowe znaczenie ma dążenie do trwałości i elastyczności rozwiązań, zwiększanie udziału materiałów pochodzących z odzysku oraz ograniczanie zużycia surowców pierwotnych. Istotnym elementem projektowania cyrkularnego jest zapewnienie możliwości demontażu elementów budynku po zakończeniu okresu użytkowania, co obejmuje stosowanie prostych rozwiązań konstrukcyjnych, uniwersalnych wymiarów oraz czytelnego układu warstwowego [2, 23].

Do kluczowych strategii zwiększania cyrkularności zalicza się również planowanie obiektów elastycznych, umożliwiających rozbudowę, zmianę funkcji lub adaptację do nowych potrzeb. Wsparciem dla tych działań jest stosowanie technologii cyfrowych, które umożliwiają integrację informacji o materiałach, rozwiązaniach technicznych i przewidywanym cyklu życia elementów budynku, a także wspierają zarządzanie obiektem w kolejnych fazach jego użytkowania, również po ewentualnej zmianie funkcji [2].

Uzupełnieniem działań projektowych jest projektowanie instalacji ograniczających zużycie energii i wody oraz uwzględnianie

potrzeb konserwacji i utrzymania obiektu w długim okresie. Takie podejście pozwala nie tylko na zmniejszenie oddziaływania środowiskowego budynków w fazie eksploatacji, lecz także na wzmocnienie całościowego podejścia do cyrkularności w ujęciu cyklu życia obiektu [2, 25]. W konsekwencji etap planowania i projektowania stanowi strategiczny punkt interwencji, w którym kształtowane są długoterminowe efekty środowiskowe i materiałowe sektora budowlanego.

9. Metody zwiększania cyrkularności na etapie realizacji obiektu

Na etapie realizacji obiektu kluczowe znaczenie ma zrównoważone zarządzanie procesem budowlanym, ukierunkowane na ograniczanie strat materiałowych i energetycznych oraz minimalizację ilości wytwarzanych odpadów. W literaturze podkreśla się, że działania podejmowane na placu budowy mają istotny wpływ na całkowity bilans środowiskowy obiektu w ujęciu cyklu życia [2, 25].

Do najczęściej wskazywanych metod zwiększania cyrkularności na etapie budowy zalicza się ograniczanie transportu materiałów poprzez dobór lokalnych źródeł zaopatrzenia, monitorowanie zużycia energii i wody oraz redukcję strat materiałowych dzięki współpracy z dostawcami umożliwiającymi zwroty niewykorzystanych materiałów [1, 13].

Istotnym elementem jest również prowadzenie selektywnej zbiórki odpadów budowlanych bezpośrednio na placu budowy, co umożliwia ich dalszy odzysk lub recykling. Zastosowanie rozwiązań organizacyjnych ograniczających zapotrzebowanie na nowy sprzęt, takich jak wypożyczanie maszyn i urządzeń, sprzyja zmniejszaniu zużycia zasobów oraz emisji związanych z realizacją robót. Coraz większe znaczenie przypisuje się także prefabrykacji, która pozwala na ograniczenie ilości odpadów, skrócenie czasu realizacji oraz redukcję emisji związanych z procesami budowlanymi [2, 4, 5].

10. Metody zwiększania cyrkularności na etapie eksploatacji

Etap eksploatacji budynku wiąże się z istotnymi oddziaływaniami środowiskowymi, w szczególności w zakresie zużycia energii, wody oraz generowania emisji, odpadów i ścieków. Z tego względu działania podejmowane w fazie użytkowania mają kluczowe znaczenie dla efektywności środowiskowej obiektu w całym cyklu życia [3, 25].

W literaturze wskazuje się, że priorytetem jest ograniczanie zużycia energii i wody poprzez stosowanie efektywnych instalacji oraz systemów monitoringu, a także prowadzenie regularnych prac konserwacyjnych, które wydłużają okres użytkowania budynku i umożliwiają wczesne wykrywanie usterek [10, 26].

Istotnym elementem zwiększania cyrkularności w fazie eksploatacji jest również zapewnienie wysokiego komfortu i bezpieczeństwa użytkowania, co sprzyja długotrwałemu użytkowaniu

obiektu bez konieczności przedwczesnych modernizacji lub rozbiórek. Dodatkowo podkreśla się znaczenie segregacji odpadów powstających w trakcie użytkowania budynków oraz edukacji użytkowników w zakresie racjonalnego gospodarowania zasobami, co wpływa na efektywność wdrażania zasad gospodarki o obiegu zamkniętym w praktyce [2, 7].

11. Metody zwiększania cyrkularności na etapie zakończenia użytkowania

Końcowy etap cyklu życia budynku obejmuje zakończenie eksploatacji oraz rozbiórkę lub demontaż obiektu, prowadzone w sposób umożliwiający maksymalny odzysk materiałów i ich ponowne wykorzystanie lub przetworzenie. W podejściu cyrkularnym priorytetem jest ograniczenie ilości odpadów oraz minimalizacja zapotrzebowania na zasoby pierwotne poprzez ponowne wprowadzanie materiałów do obiegu gospodarczego [2, 15, 32].

Kluczowe znaczenie przypisuje się inwentaryzacji materiałowej obiektów, uporządkowanemu demontażowi oraz selektywnej segregacji elementów konstrukcyjnych i wykończeniowych umożliwiających ich ponowne użycie lub wysokiej jakości recykling. Badania wskazują, że takie podejście pozwala na istotne ograniczenie oddziaływań środowiskowych w końcowej fazie cyklu życia budynku oraz wzmacnia efektywność wdrażania zasad gospodarki o obiegu zamkniętym w sektorze budowlanym [4, 5, 25, 32].

12. Przykład wdrażania zasad GOZ w budownictwie

Praktyczne wdrażanie zasad GOZ w środowisku zabudowanym coraz częściej analizowane jest poprzez przykłady obiektów demonstracyjnych integrujących rozwiązania materiałowe, organizacyjne oraz edukacyjne. Przykładem takiego podejścia są realizacje na kampusie Okayama University w Japonii, w tym koncepcja „Wooden Classroom” autorstwa Kengo Kuma & Associates, ukazująca potencjał budownictwa drewnianego w modelu hybrydowym. Obiekt integruje elementy z drewna klejonego krzyżowo (CLT) z komponentami stalowymi oraz transparentnym daszeniem szklanym, podkreślając możliwość łączenia materiałów odnawialnych z rozwiązaniami konwencjonalnymi przy zachowaniu wymagań funkcjonalnych i konstrukcyjnych (rys. 3). Obiekt wybrano jako przykład demonstracyjny ze względu

Rys. 3. „Wooden Classroom”: hybrydowa konstrukcja z drewna (CLT), stali i szkła jako przykład projektowania cyrkularnego w obiekcie dydaktycznym (źródło: Vaverková, Okayama, 2023)



na integrację rozwiązań materiałowych, edukacyjnych i projektowych zgodnych z zasadami GOZ.

Poza funkcją dydaktyczną projekt pełni funkcję przestrzeni demonstracyjnej wspierającej edukację w zakresie zrównoważonego projektowania oraz świadomego gospodarowania zasobami, angażując użytkowników w refleksję nad środowiskowymi konsekwencjami decyzji projektowych. Podejście to pozostaje spójne z japońską koncepcją „mottainai”, akcentującą ograniczanie marnotrawstwa materiałów i energii, efektywne zarządzanie zasobami oraz harmonizację obiektów z otoczeniem jako element odpowiedzialnej praktyki inżynierskiej [27]. Jednocześnie interdyscyplinarna współpraca pomiędzy naukami inżynierskimi, środowiskowymi i społecznymi wskazywana jest jako kluczowy czynnik wspierający wdrażanie zrównoważonych i cyrkularnych rozwiązań w środowisku zabudowanym [28]. W kontekście gospodarki materiałowej szczególne znaczenie przypisuje się również selektywnemu demontażowi oraz ponownemu wykorzystaniu materiałów budowlanych i rozbiórkowych, które stanowią istotne źródło surowców wtórnych ograniczających zapotrzebowanie na zasoby pierwotne i emisje związane z produkcją nowych materiałów [29].

Analiza literatury wskazuje, że autorzy są zgodni co do kluczowej roli etapu projektowania w zwiększaniu cyrkularności budynków [1, 2, 4], jednak różnią się w ocenie znaczenia poszczególnych narzędzi i warunków wdrożenia. Część publikacji eksponuje rozwiązania materiałowe i techniczne [2, 15, 23], podczas gdy inne podkreślają znaczenie barier organizacyjnych i instytucjonalnych [1, 4, 5]. Krytycznie należy zauważyć, że wiele opisywanych rozwiązań ma nadal charakter koncepcyjny, a liczba badań potwierdzających ich skuteczność w praktyce jest ograniczona, szczególnie w odniesieniu do fazy eksploatacji i zakończenia użytkowania obiektów.

13. Podsumowanie

Analiza zagadnień związanych z gospodarką o obiegu zamkniętym w budownictwie potwierdza, że skuteczne zwiększanie cyrkularności wymaga podejścia obejmującego cały cykl życia obiektu budowlanego. Kluczowe znaczenie mają

decyzje podejmowane na etapie planowania i projektowania, ponieważ w największym stopniu determinują one późniejsze możliwości ograniczania zużycia zasobów, emisji oraz ilości odpadów. Istotną rolę odgrywają także działania realizacyjne ograniczające straty materiałowe i energetyczne, rozwiązania eksploatacyjne wydłużające okres użytkowania obiektu oraz selektywny demontaż umożliwiający odzysk materiałów po zakończeniu eksploatacji.

W warunkach wdrażania zasad gospodarki o obiegu zamkniętym w budownictwie za najważniejsze należy uznać zwiększanie znaczenia modernizacji, adaptacji i ponownego wykorzystania istniejących obiektów, uwzględnianie kryteriów cyrkularnych już na etapie projektowania, rozwój rozwiązań umożliwiających demontaż i ponowne użycie elementów budynku, szersze stosowanie materiałów wtórnych oraz wdrażanie narzędzi oceny cyklu życia wspierających wybór rozwiązań najbardziej efektywnych środowiskowo. Równocześnie niezbędne pozostaje wzmacnianie współpracy pomiędzy projektantami, wykonawcami, inwestorami i użytkownikami, ponieważ skuteczność wdrażania gospodarki o obiegu zamkniętym zależy nie tylko od dostępności rozwiązań technicznych, lecz także od warunków organizacyjnych i instytucjonalnych. W warunkach Polski działania te należy uznać za podstawowe kierunki transformacji sektora budowlanego.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Munaro M. R., Tavares S. F., A review on barriers, drivers, and stakeholders towards the circular economy: The construction sector perspective, *Cleaner and Responsible Consumption* 8, 2023, art. 100107, <https://doi.org/10.1016/j.clrc.2023.100107>
- [2] Bragança L., Griffiths P., Askar R., Salles A., Ungureanu V., Tsikaloudaki K., Cvetkovska M., Circular Economy Design and Management in the Built Environment: A Critical Review of the State of the Art, Springer, Cham: 2025, <https://doi.org/10.1007/978-3-031-73490-8>
- [3] David L. O., Aigbavboa C., Adepoju O., Nnamdi N., Applying circular economy strategies in mitigating the perfect storm: The built environment context, *Sustainable Futures*, 2025, art. 100444, <https://doi.org/10.1016/j.sfsr.2025.100444>
- [4] van Uden M., Wamelink H., van Bueren E., Heurkens E., Aligning practices towards a circular economy in the architecture, engineering, and construction sector: Seven transitions in different stages of reconfiguration, *Construction Management and Economics* 43, 2/2025, str. 153–174, <https://doi.org/10.1080/01446193.2024.2401829>
- [5] van Uden M., Wamelink H., van Bueren E., Heurkens E., Circular building hubs as intermediate step for the transition towards a circular economy, *Construction Management and Economics* 43, 6/2025, str. 446–464, <https://doi.org/10.1080/01446193.2025.2451618>
- [6] Chodkowska-Miszczuk J., Rogatka K., Lewandowska A., The Anthropocene and ecological awareness in Poland: The post-socialist view, *The Anthropocene Review* 10, 2/2023, str. 494–523, <https://doi.org/10.1177/20530196211051205>
- [7] Kowalska M., Chomać-Pierzecka E., Sustainable development through the lens of climate change: A diagnosis of attitudes in southeastern rural Poland, *Sustainability* 17, 12/2025, str. 5568, <https://doi.org/10.3390/su17125568>
- [8] Orzeł B., Wolniak R., Digitization in the design and construction industry: Remote work in the context of sustainability, *Sustainability* 14, 3/2022, str. 1332, <https://doi.org/10.3390/su14031332>
- [9] Wieczorek D., Zima K., Analysis of the selection of materials for road construction taking into account the carbon footprint and construction costs, *Archives of Civil Engineering* 68, 3/2022, str. 199–219, <https://doi.org/10.24425/ace.2022.141881>
- [10] Horzela-Mis A., Semrau J., Enhancing energy efficiency in Poland's construction sector: Simulating renewable energy and storage integration, *International Journal of Energy Research*, 2025, art. 6646016, <https://doi.org/10.1155/er/6646016>
- [11] Hassan M. W., Manowska A., Kienberger T., A breakthrough in achieving carbon neutrality in Poland: Integration of renewable energy sources and Poland's 2040 energy policy, *Energy Reports* 13, 2025, str. 653–669, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.12.033>
- [12] Szpak A., Modrzyńska J., Piechowiak J., Resilience of Polish cities and their rainwater management policies, *Urban Climate* 44, 2022, art. 101228, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101228>
- [13] Weigert M., Melnyk O., Winkler L., Raab J., Carbon emissions of construction processes on urban construction sites, *Sustainability* 14, 19, 2022, art. 12947, <https://doi.org/10.3390/su141912947>
- [14] Rajabi S., El-Sayegh S., Romdhane L., Identification and assessment of sustainability performance indicators for construction projects, *Environmental and Sustainability Indicators* 15, 2022, art. 100193, <https://doi.org/10.1016/j.indic.2022.100193>
- [15] Dsilva J., Zarmukhambetova S., Locke J., Assessment of building materials in the construction sector: A case study using life cycle assessment approach to achieve the circular economy, *Heliyon*, 2023, e20404, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20404>
- [16] International Energy Agency, Empowering cities for a net zero future: Unlocking resilient, smart, sustainable urban energy systems, IEA, Paris, 2021
- [17] Główny Urząd Statystyczny, Ochrona środowiska 2023, GUS, Warszawa, 2023
- [18] Keys A., Sutherland A., Sigüenza C., The Circularity Gap Report Poland, Circle Economy, Amsterdam, 2022
- [19] Abujder Ochoa W. A., Iarozinski Neto A., Vitorio Junior P. C., Calabokis O. P., Ballesteros-Ballesteros V., The theory of complexity and sustainable urban development: A systematic literature review, *Sustainability* 17, 1/2025, str. 3, <https://doi.org/10.3390/su17010003>
- [20] Kulczycka J., Gospodarka o obiegu zamkniętym w polityce i badaniach naukowych, IGSMiE PAN, Kraków, 2019
- [21] Oyebamiji H. O., Adewuyi A. Y., Halidu A., Togo B., Alebiosu Y. T., Atilola M. O., Atanda A. A., Integrating circular economy in retrofit: Global practices in sustainable construction, *Journal of Management and Development Research* 2, 2/2025, str. 10–18, <https://doi.org/10.69739/jmdr.v2i2.811>
- [22] Marrucci L., Daddi T., Iraldo F., Boosting circular economy solutions in the construction sector using a life cycle assessment, *Journal of Industrial Ecology* 29, 2/2025, str. 473–485, <https://doi.org/10.1111/jiec.13614>
- [23] Hamida M. B., Remøy H., Gruis V., Jylhä T., Circular building adaptability in adaptive reuse: Multiple case studies in the Netherlands, *Journal of Engineering, Design and Technology* 23, 1/2025, str. 161–183, <https://doi.org/10.1108/JEDT-08-2022-0428>
- [24] Berger R., It's time for construction to embrace the circular economy, Roland Berger, dostęp: 08.02.2026, <https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Its-time-for-construction-to-embrace-the-circular-economy.html>
- [25] Khadim N., Agliata R., Han Q., Mollo L., From circularity to sustainability: Advancing the whole building circularity indicator with life cycle assessment, *Building and Environment*, 269, 2025, art. 112413, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112413>
- [26] Adamczak-Bugno A., Rola jakości w dążeniu do trwałego budownictwa, dostęp: 08.02.2026, <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-cf18fe3d-3d82-4734-a8e3-64e316260b06>
- [27] Vaverkova M., Matsui, Y., Vaverka I., Mottainai in civil engineering – A message from Japan, *Acta Scientiarum Polonorum Architectura* 22, 2023, str. 205–217, <https://doi.org/10.22630/ASPA.2023.22.20>
- [28] Vaverková M. D., Polak J., Kurcusz M., Jena M. K., Murali A. P., Nair S. S., Franc-Dąbrowska J., Enhancing sustainable development through interdisciplinary collaboration: Insights from diverse fields, *Sustainable Development* 33(3)2025, str. 3427–3454, <https://doi.org/10.1002/sd.3302>
- [29] Koda E., Podlasek A., Sustainable use of construction and demolition wastes in a circular economy perspective. Chapter 10 in Book: Sustainable and Circular Management of Resources and Waste Towards a Green Deal, Elsevier, Amsterdam, ISBN: 978-0-323-95278-1 (465 pp), 1/2023, str. 137–147, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95278-1.00027-9>

Cyfryzacja procesów budowlanych: znaczenie kodów QR i projektowania parametrycznego we współczesnym budownictwie

Digitalization of construction processes: the importance of QR codes and parametric design in modern construction

dr inż. arch. Anna Piętocha (ORCID: 0009-0002-4740-3133), Instytut Inżynierii Lądowej, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7922

Streszczenie: Branża budowlana stanowi sektor wysokiego ryzyka. Wypadki na budowie spowodowane są najczęściej niebezpiecznym zachowaniem ludzi i wynikają z niewystarczającej komunikacji lub ograniczonego dostępu do aktualnych informacji. Problemem badawczym jest niska integracja systemów informacji na placach budowy, a także ograniczona interoperacyjność pomiędzy technologiami BIM i systemami identyfikacji cyfrowej. Obecnie współczesne technologie w budownictwie i ewolucja związana z rozwojem narzędzi wspomagania komputerowego, w tym projektowania parametrycznego i technologii BIM spowodowały ewolucję placów budowy w kierunku inteligentnych miejsc pracy. Użycie QR kodów w celu ułatwienia przepływu informacji i ich połączenie z systemami rejestracji obecności, monitoringiem sprzętu czy cyfrowymi platformami zarządzania projektem, sprzyja automatyzacji i standaryzacji. Celem artykułu jest ocena możliwości Integracji kodów QR z projektowaniem parametrycznym i technologiami BIM w kontekście poprawy bezpieczeństwa, efektywności oraz cyfryzacji procesów budowlanych. W pracy zastosowano metodę przeglądu literatury i analizę studiów przypadków wdrożeń technologii cyfrowych w budownictwie w latach 2021–2025. Wyniki wskazują, że integracja kodów QR, BIM i projektowania parametrycznego zwiększa efektywność zarządzania informacją, a także poprawia poziom bezpieczeństwa pracy na budowie.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo budowy, kod QR, zarządzanie placem budowy, modelowanie informacji o budynku.

Abstract: The construction industry is a high-risk sector. Construction is most often caused by unsafe behavior and stems from insufficient communication or limited access to current information. The research problem is the low integration of information systems on construction sites and the limited interoperability between BIM technologies and digital identification systems. Currently, modern construction technologies and the evolution of computer-aided tools, including parametric design and BIM technology, have led to construction sites evolving toward smart workplaces. The use of QR codes to facilitate information flow and their integration with attendance systems, equipment monitoring, and digital project management platforms promotes automation and standardization. The aim of the article is to assess the possibilities of integrating QR codes with parametric design and BIM technologies in the context of improving safety, efficiency and digitization of construction processes. The paper uses a literature review and case study analysis of digital technology implementations in construction in 2021–2025. The results indicate that the integration of QR codes, BIM and parametric design increases the efficiency of information management and improves the level of work safety on construction sites.

Keywords: construction safety, QR code, construction site management, building information modeling.

1. Wprowadzenie

Dynamiczny rozwój technologii budowlanych umożliwia projektowanie i realizację skomplikowanych struktur, a także przyczynia się do możliwości poprawy bezpieczeństwa pracy. Jednocześnie, pomimo wprowadzania wielu działań prewencyjnych, upadki – zwłaszcza te z wysokości, należą do najczęstszych przyczyn śmiertelnych zdarzeń w budownictwie [1]. Dane z globalnego raportu o wypadkach w Unii Europejskiej wskazują branżę budowlaną za sektor wysokiego ryzyka, a place budowy za najniebezpieczniejsze miejsca. Większość incydentów spowodowana jest niebezpiecznym zachowaniem pracowników.

Często wynika to z ograniczonego dostępu do aktualnych informacji oraz niewystarczającej komunikacji na placach budowy. Równocześnie sytuacje te prowadzą do zwiększonego ryzyka i opóźnień prac. Ze względu na złożoność placów budowy, inspektorzy bezpieczeństwa zmagają się z trudnościami polegającymi na rozpoznawaniu i rejestrowaniu potencjalnych zagrożeń, identyfikacji niebezpiecznych incydentów w czasie rzeczywistym oraz terminowym raportowaniem i udostępnianiem wykrytych incydentów właściwym uczestnikom procesu [2]. Place budowy muszą ewoluować w kierunku inteligentnych miejsc pracy z możliwością monitorowania pracowników w czasie rzeczywistym [3]. Wykorzystanie technologii śledzenia

do wykrywania ruchu pracowników, materiałów i sprzętu jest kluczowe w każdej operacji budowlanej, ponieważ pomaga zidentyfikować potencjalne zagrożenie bezpieczeństwa [4]. Typowy plac budowy budynku wielorodzinnego przedstawia rysunek 1a, b. Cyfryzacja procesów na budowie stanowi odpowiedź na wyzwania związane z poprawą bezpieczeństwa i efektywnością realizacji. Umożliwia integrację danych projektowych, wykonawczych i eksploatacyjnych w czasie rzeczywistym. Jednym z najbardziej dostępnych i nisko kosztowych narzędzi stają się kody QR, które mogą być wykorzystane jako dostęp do aktualnych wersji dokumentów cyfrowych, instrukcji obsługi sprzętu, procedur bezpieczeństwa na placu budowy, zasobów szkoleniowych czy kontaktów w nagłych wypadkach. Równolegle, ewolucja, która nastąpiła w związku z rozwojem narzędzi wspomagania komputerowego, umożliwiła tworzenie dotychczas niemożliwych do wykonania krzywoliniowych form. Projektowanie parametryczne – metoda, która steruje wynikiem projektu poprzez ustalenie kluczowych parametrów i ich wzajemnych powiązań, w połączeniu ze standaryzacją i reprodukcją materiałów, zmniejsza ich ilość, wagę i koszt. Jest to kluczowe narzędzie do tworzenia budynków zgodnie z Celami zrównoważonego rozwoju zawartymi w Agendzie na rzecz zrównoważonego rozwoju 2030, przyjętej przez wszystkie państwa członkowskie ONZ. Współczesne procesy prefabrykacji wykorzystują modele parametryczne do produkcji elementów konstrukcyjnych w celu zapewnienia ich identyfikowalności i precyzyjnego montażu. Praktyki budowlane obserwowane m.in. w realizacjach w Chinach, wskazują, że połączenie projektowania parametrycznego i cyfrowej identyfikacji (w tym kodów QR) umożliwia montaż komponentów skomplikowanych struktur z dokładnością do kilku milimetrów, zmniejszając w ten sposób straty materiałów.

W niniejszym artykule analizowany jest problem integracji technologii cyfrowych w kontekście poprawy bezpieczeństwa oraz efektywności procesów budowlanych. Badanie opiera się na przeglądzie literatury oraz analizie wybranych wdrożeń technologii cyfrowych w budownictwie, ze szczególnym uwzględnieniem narzędzi projektowania parametrycznego, systemów AR/QR oraz kodów QR. Celem artykułu jest analiza roli cyfrowych technologii identyfikacji (QR/AR), projektowania parametrycznego w poprawie bezpieczeństwa i efektywności procesów budowlanych.

2. Projektowanie parametryczne i BIM

Projektowanie parametryczne to metoda, która opiera się na matematycznych algorytmach i zmiennych parametrach. Projekt określa zatem zbiór reguł i zależności, które definiują, jak odnoszą się do siebie poszczególne elementy. Chociaż definicję projektowania parametrycznego zdefiniował Moretti już na początku lat 70. XX w. jako „badanie relacji między wymiarami” w oparciu o parametry, a w 1989 r. Kalay uznał modelowanie parametryczne za obliczeniową reprezentację relacji geometrycznych, które aktualizują się automatycznie na ekranie, to dopiero rewolucja narzędzi projektowych, takich jak CAD



Fot. Anna Piętocha

Rys. 1. Plac budowy Prochowa 44, Warszawa. Projekt: MWH Architects, A. Wyszyński, A. Uścińowicz, A. Piętocha, 2019 r.

i BIM spowodowała rzeczywisty rozwój architektury parametrycznej. Dalece parametryczne, ikoniczne i znane w świecie projekty tworzyli architekci Zaha Hadid i Frank Gehry. Frank Gehry pod koniec lat 80. XX w. zaczął stosować program CATIA, pierwotnie stworzony na potrzeby inżynierii lotniczej i kosmicznej. Narzędzie to umożliwiło architektowi realizację niezwykle złożonych form, które wcześniej były niemal niemożliwe do zaprojektowania z tak precyzyjną kontrolą zachowania materiałów. Muzeum Guggenheima w Bilbao, otwarte w 1997 r. stanowi doskonały przykład biegłości projektanta w tej technologii. Płynna fasada wykonana z tytanu, inspirowana była ruchem ryby, w związku z czym projekt i budowa wymagały niespotykanej dotąd precyzji. Sala koncertowa Walta Disneya z 2003 r. stanowi przykład, w którym program CATIA przyczynił się do optymalizacji estetyki i funkcjonalności, dzięki czemu sztuka i dźwięk współgrały ze sobą. Programy takie jak Archicad (opracowany w 1987 r.) i Revit to kluczowe narzędzia środowiska BIM (Building Information Modeling) umożliwiające parametryczne projektowanie elementów budynku. BIM stanowi zaawansowaną technologię projektowania cyfrowego zawierającą informacje architektoniczne, konstrukcyjne i systemowe zawarte w modelu 3D [5]. Praca w środowisku BIM ułatwia projektowanie interdyscyplinarne, przetwarzając informacje o budynku na przestrzeni całego cyklu życia. BIM i narzędzia z nim związane, uważane są za skuteczne narzędzie ułatwiające ocenę zielonego budownictwa. Wspierają analizy akustyczne, emisji dwutlenku węgla, analizy oświetlenia, zarządzanie odpadami budowlanymi i rozbiórkowymi, a także operacyjne zużycie energii i wody [6]. Modelowanie parametryczne, stosowane w BIM, przyspiesza generowanie i modyfikację modelu [7]. Rhinoceros 3D (stworzony w 1998 r.) to program do modelowania powierzchni swobodnych, który wykorzystuje matematyczny model NURBS. Program ten, w połączeniu z Grasshopperem, umożliwia parametryczne generowanie geometrii i eksplorację złożonych relacji formalnych. Rhinoceros 3D stało się podstawą projektu Guangzhou Opera House w Guangzhou w Chinach (rys. 2a). Oprogramowanie Digital Project oraz narzędzia BIM zostały wykorzystane podczas projektowania Soho

Rys. 2. *Guangzhou Opera House, Guangzhou, Chiny, 2025 r. (a), Soho Galaxy, Pekin, Chiny, 2024 r. (b)*

Galaxy w Pekinie, składającego się z czterech głównych, kopułowych struktur połączonych ze sobą platformami (rys. 2b). Zakrzywione krawędzie tworzą przestrzenie przenikających się dziedzińców. Aby spełnić wymagania konstrukcyjne dotyczące odporności sejsmicznej

Fot. Anna Piętocha



i wiatrowej, podczas projektowania CITIC Tower w Pekinie (rys. 3a), o wysokości 528 m, użyto technologii projektowania parametrycznego, która miała na celu znalezienie najbardziej efektywnego systemu konstrukcji obwodowej [8].

Budynek o kształcie zwężającym się do wysokości 385 m, a następnie rozszerzającym się ku górze, znajduje się w strefie wysokiej aktywności sejsmicznej [9]. Zastosowanie technologii BIM pozwoliło na uniknięcie wielu kolizji a także na zoptymalizowanie układu konstrukcyjnego. Na bieżąco aktualizowano i precyzyjnie rozmieszczano elementy, aby ograniczyć straty materiałowe [10, 11]. Technologia 3D BIM wykorzystano do dynamicznego wyświetlania kolejności montażu prętów zbrojeniowych, a także kierowania budową Beijing Daxing International Airport w Pekinie (rys. 3b).

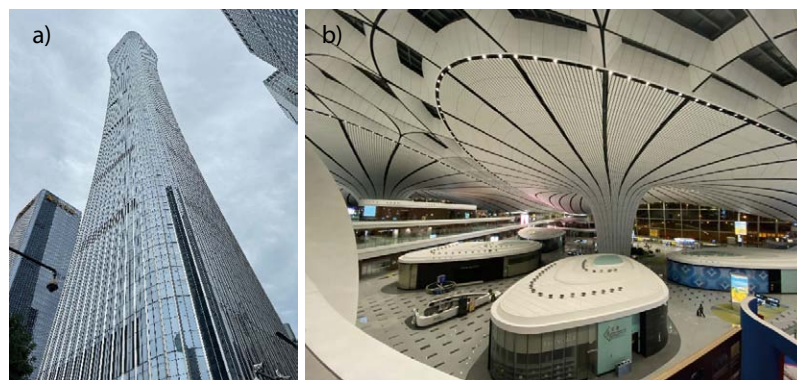
Konstrukcja terminala jest bardzo długa i bardzo szeroka, w związku z tym zastosowano innowacyjne technologie kontrolujące pęknięcia betonowych elementów. Oprócz pasów konstrukcyjnych, o szerokości 1 m, rozmieszczonych co 40 cm, zastosowano stalowe pasy o szerokości 4–6 m, rozmieszczone co 150 cm. W konstrukcji zastosowano między innymi pręty zbrojeniowe zapobiegające pękaniu; beton zazbrojono włóknem, wykonano spoiny indukcyjne na bardzo długiej ścianie, a także umieszczono gumowe łożyska izolacyjne o dużej średnicy na szczytach kolumn pod płytą stropową. BIM wspomógł symulację i optymalizację elementów o nadmiernej wadze oraz procesu usztywniania konstrukcji, co pozwoliło na osiągnięcie optymalnego schematu budowy, kontrolę wstępną, a także lepszą wydajność i obniżenie kosztów Beijing Daxing International Airport [12]. Istnieje wiele badań polegających na stworzeniu prototypów śledzenia aktywności na budowie opartego na modelowaniu informacji o budynku (BIM). Zhang i in. przeprowadzili badanie na budowie, podczas którego, rejestratory GPS montowane były na kaskach pracujących ekip. Następnie zebrane dane były przysyłane i wizualizowane na platformie BIM w celu wykrywania potencjalnych konfliktów podczas brygadami lub między sprzętem do podnoszenia materiałów podczas wykonywania betonowych kolumn wykonywanych na miejscu [13]. Wielu badaczy wskazuje, że metodologię BIM

można z powodzeniem stosować w planowaniu bezpieczeństwa pracy i zapobieganiu wypadkom na budowie [7, 14–16]. Systematyczny przegląd 95 artykułów naukowych z baz danych Scopus i Web of Science, wykonany przez Daniel'a w 2025 r., wykazał, że zastosowanie technologii cyfrowych w bezpieczeństwie budownictwa koncentruje się przede wszystkim na tworzeniu modeli i symulacji. Wnoszą one wkład poprzez udoskonalenie szkoleń pracowników, poprawę możliwości przewidywania ryzyka, monitorowanie w czasie rzeczywistym, a także usprawnienie komunikacji i wspieranie interwencji w zakresie bezpieczeństwa. Do najczęściej wykorzystywanych technologii cyfrowych należy rzeczywistość wirtualna (VR), modelowanie informacji o budynku (*Building Information Modeling* – BIM), uczenie maszynowe i sztuczna inteligencja (AI) [17]. Symulacja 4D w technologii BIM to połączenie modelowania informacji o budynku zintegrowanego z czwartym wymiarem jaki jest czas. Pozwala to na tworzenie wizualizacji procesu budowy w czasie rzeczywistym, a dzięki temu precyzyjne zaplanowanie harmonogramu prac, identyfikację potencjalnych opóźnień a także optymalizację zarządzania projektem [7].

Nieracjonalne planowanie żurawii często prowadzi do kolizji. W Chinach, ekstremalne warunki pogodowe, takie jak wysoka temperatura, wiatr czy śnieg, mogą spowodować uszkodzenie lub nawet zawalenie wieży. Plac budowy osiedla mieszkaniowego CentralPark w Gdańsku przedstawia rysunek 4a i plac budowy osiedla mieszkaniowego Growing House w Zhengzhou w Chinach – rysunek 4b.

Ze względów bezpieczeństwa, do monitorowania budowy wykorzystuje się BIM. Dzięki technologii IoT (Internetu Rzeczy) i platformie chmurowej, informacje gromadzone są w czasie rzeczywistym przez czujniki umieszczone na żurawiu. Są one synchronizowane z modelem BIM, dzięki czemu możliwa jest

Rys. 3. *China Zun Tower, Pekin, Chiny, 2024 r. (a), Daxing International Airport, Pekin, Chiny, 2024 r. (b)*



Fot. Anna Piętocha



Rys. 4. Plac budowy budynku nr 3 osiedla mieszkaniowego CentralPark w Gdańsku. Projekt: MWH Architects, A. Wyszyński, A. Piętocha, 2025 r. (a), plac budowy osiedla mieszkaniowego Growing House, Zhengzhou, China, 2025 r. (b)

Fot. Anna Piętocha

opiera się na informacji, nadawcy, odbiorcy, formie informacji, kanałach służących do przesyłania wiadomości oraz łączach kanałowych [25].

Branża budowlana początkowo bardzo ostrożnie podchodziła do stosowania kodów QR, jednakże w 2012 r. wykorzystywane były już w marketingu, a także służyły do śledzenia materiałów i narzędzi. Atutem stosowania kodów QR jest łatwość nawiązywania kontaktów z klientami, partnerami i potencjalnymi pracownikami za pomocą odnośnika przenoszącego do mediów społecznościowych, strony internetowej, wizytówek profesjonalistów z branży czy formularzy ankiet, zbierających opinie – umieszczanych na tablicach informacyjnych. Integracja kodów QR z systemami rejestracji obecności, monitoringiem sprzętu i cyfrowymi platformami zarządzania projektem, sprzyja automatyzacji i standaryzacji przepływu informacji. Usprawnia także weryfikację personelu budowy i personelu zewnętrznego. Rozwiązanie to pełni funkcję interfejsu łączącego fizyczny plac budowy z cyfrowym modelem informacji o projekcie (BIM), umożliwiając szybki dostęp do danych w czasie rzeczywistym. Podsystem kodów QR na placu budowy realizuje również takie zadania jak schematyzacja montażu/demontażu/eksploatacji materiałów budowlanych, elementów montażowych i sprzętu. Van Groesen i Pauwels w swoim badaniu wyszczególniają technologie śledzenia zasobów geoprzestrzennych stosowanych w przemyśle: kody QR, identyfikacja radiowa (RFID), technologia ultraszerokopasmowa (UWB) i globalne systemy pozycjonowania (GPS) [26]. Sabzevar i in. wskazują, że specjaliści wyrażają zaufanie do potencjału hybrydowego systemu zwanego AR-QR w zakresie łagodzenia ograniczeń związanych z tradycyjnymi metodami na placach budowy [25]. Hybrydowe podejście, zwane AR-QR code, którego celem jest udoskonalenie konwencjonalnej metody dostępu do informacji, wykorzystuje potencjał rozszerzonej rzeczywistości AR (Augmented Reality). Podejście to wypełnia lukę pomiędzy metodami papierowymi i cyfrowymi, aby równocześnie zachować zalety podejścia papierowego i ominąć jego wady. Zapewnia to ekipom budowlanym bezpośredni dostęp do informacji projektowych poprzez centralizację danych, bez konieczności odwoływania się do innych rysunków i dokumentów [24]. Koenen, kierownik projektu w Skanska USA Building Inc., w 2021 r. podkreślał, że użył w projekcie funkcji Procore's Location QR Codes do wydrukowania i przyklejenia kodu QR na drzwiach każdego pomieszczenia siedziby firmy. Kod odnosił się do wszystkich wymagań dotyczących inspekcji w ścianach. Ekipy skanowały kod w celu sprawdzenia list kontrolnych i nierozwiązanych problemów. Nadzorczy mogli w łatwy sposób ocenić stopień ukończenia i sprawdzić prace pozostałe do zrobienia. Jako długoterminową korzyść, Koenen wskazał łatwość

wizualizacji i wykonywanie obliczeń w czasie rzeczywistym [18]. Wykrycie powtarzających się cech, które kończą się wypadkami, przyczynia się do zapobiegania urazom i ofiarom śmiertelnym [19]. Manzoor i in. podkreślają, że technologia cyfrowa, a zwłaszcza BIM stanowi niezbędne narzędzie zwiększające bezpieczeństwo budowy, ponieważ ułatwia opracowanie skomplikowanych, wirtualnych modeli jeszcze przed rozpoczęciem ich budowy. Działanie to umożliwia identyfikację potencjalnych zagrożeń przed rozpoczęciem fizycznej budowy. BIM można stosować także w celach szkoleniowych. Wirtualne symulacje i wizualizacje pozwalają pracownikom lepiej zrozumieć plany bezpieczeństwa, protokoły i procedury w kontrolowanym środowisku. Kierownicy projektów mogą używać BIM do identyfikowania regionów i zadań wysokiego ryzyka [20].

3. Cyfrowa identyfikacja w budownictwie: QR i AR

Tradycyjne metody dostarczania danych na budowie, oparte na rysunkach warsztatowych, specyfikacjach i instrukcjach ustnych, przyczyniają się do wzrostu liczby błędów i trudności w dostępie do informacji. Badanie Sabzevara i in. podkreśla, że w 2018 r. słaba komunikacja i niewystarczający dostęp do dokumentacji projektowej spowodowały straty w amerykańskim przemyśle budowlanym, wynoszące ponad 31 mld dolarów. Stosowanie kodów QR stanowi alternatywę dla tradycyjnej, papierowej wersji dokumentacji. Umożliwia łatwy dostęp do aktualnych wersji dokumentów cyfrowych, takich jak projekty, instrukcje obsługi czy procedury bezpieczeństwa. Kod QR, którego nazwa pochodzi od Quick Response Code, to dwuwymiarowy matrycowy kod kreskowy wynaleziony przez japońską korporację Denso Wave w 1994 r., zaprojektowany do śledzenia części pojazdów podczas ich produkcji. W stosunku do konwencjonalnego kodu kreskowego, posiada dużo większą pojemność pamięci informacji [21, 22]. Standardowy kod QR to czarno – biały kwadrat (moduł) oznaczający bit binarny 1 lub 0, a zakodowana na nim informacja może być tekstem, adresem URL albo innymi danymi [23]. Im większą ilość zawiera kod QR, tym większa jest ilość pikseli, z jakich się składa. Jeśli do kodu wprowadzone zostaną informacje o dużej pojemności, to do jego rozpoznania będzie wymagane również urządzenie o dużej rozdzielczości [24]. Obecnie kody QR stosowane są w aplikacjach używanych na co dzień. Budowa kodu umożliwia jego umieszczenie i odczyt na przedmiotach, które przemieszczają się szybko względem skanera. Proces komunikacji

i szybkość dostosowania systemu do kolejnego projektu. System ocenił za efektywny i pozwalający na oszczędność czasu dzięki braku konieczności sprawdzania wielu stron dokumentacji. Użycie kodów QR ułatwiło także orientację w pomieszczeniach [27]. Projekt terminala wschodniego portu Yantian w Shenzhen w Chinach, stanowi przykład połączenia wykorzystania BIM i inteligentnego systemu zarządzania placem budowy. IoT gromadzi dane z placu w cza-

sie rzeczywistym stosując inteligentny sprzęt i analizując dane za pomocą chmury obliczeniowej. Monitoring wideo dotyczył kluczowych obszarów takich jak wykopy, place prefabrykacji czy platformy wodne. Wyniki analizy, dostarczają kadrze sugestii za pomocą platformy BIM, wspomagających podejmowane decyzje. Wykorzystany system wczesnego ostrzegania AI alarmuje menedżerów o zachowaniach niezgodnych z procedurami a także przypomina i ostrzega personel o konieczności noszenia odpowiedniego sprzętu ochrony osobistej. Inteligentne kaski ochronne zintegrowane są z systemem budowy i wyposażone w kamerę. Dzięki połączeniu wi-fi możliwe są połączenia głosowe i wideo w czasie rzeczywistym a także pozycjonowanie GPS, alarm o zdjęciu kasku, alarm o upadku i kolizji, ostrzeżenie o przegrzaniu czy przycisk alarmowy SOS [28]. China Construction Third Engineering Bureau Group Co., Ltd. zaprojektowała kody QR, które następnie zostały umieszczone na maszynach, urządzeniach oraz materiałach budowlanych użytych w projekcie (rys. 5a). Kod jest skanowany przez multiplikację WeChat (obsługującą m.in. wiadomości tekstowe, głosowe, wideokonferencje, gry wideo, płatności mobilne, udostępnianie zdjęć i filmów, zakup biletów, udostępnianie lokalizacji, miniprogramy), zainstalowaną na telefonie komórkowym. W ten sposób, na przykład po wykonaniu prac konserwacyjnych sprzętu, personel może skanując kod, łatwo sprawdzić zgodność parametrów z ustawionymi punktami kontrolnymi. Natomiast administratorzy, ze swojego poziomu, korzystając z miniprogramu, mają możliwość sprawdzenia zgłoszonych usterek oraz potwierdzenia czy przeglądy zostały wykonane na czas. Dane są przechowywane na serwerze i mogą zostać wyeksportowane do plików Excel lub PDF. Kody QR znajdują się również na dużych urządzeniach czy skrzynkach rozdzielczych a te, które umieszczane są na kaskach pracowników, mogą również służyć do sprawdzenia tożsamości, a także potwierdzenia statusu szkolenia [29]. Budowę DC01 Data Center w Jawczycach, realizowaną przez PORR od lutego 2022 r. do marca 2023 r. wspierały współczesne narzędzia cyfrowe. Podczas realizacji inwestycji korzystano z elektronicznej platformy obiegu dokumentacji projektowej Autodesk Construction Cloud. Platforma ta służyła także gromadzeniu całej aktualnej dokumentacji, do której miał dostęp każdy uczestnik procesu



Rys. 5. Wykorzystanie kodów QR do zarządzania placem budowy w China Construction Third Engineering Bureau Group Co., Ltd., (a), źródło: <https://cli.im/client/detail/1766>, tablica z kodami QR na budowie drucznego odcinka linii lotniskowej nr 17 Grupy Biura Kolei Chińskich (b), źródło: https://www.i3vsoft.com/Mobile/uploadfiles/pictures/product/20230726172715_0338.jpg_280.jpg, dostęp: 2026-03-11

budowlanego, jak również wykorzystywana była do działań BHP. Zastosowanie modelu BIM umożliwiło szybkie wykrywanie kolizji i wprowadzanie szybkich rewizji. Podczas prac wykorzystano także skanowanie laserowe, zdjęcia 360° i kody QR, które dawały możliwość łatwego sprawdzenia postępu prac.

4. Cyfryzacja procesów budowlanych w Prawie budowlanym

Cyfryzacja procesów budowlanych w polskim Prawie budowlanym polega na zastąpieniu dokumentacji papierowej oraz tradycyjnej komunikacji z organami administracji publicznej, formą elektroniczną. Zgodnie z Art. 33 ust. 2b do wniosku o pozwolenie na budowę można dołączyć projekt zagospodarowania działki lub terenu oraz projekt architektoniczno-budowlany w postaci elektronicznej zamiast papierowej. Art. 34 ust. 2c, określa, że wnioski o pozwolenie na budowę składa się w wersji papierowej albo formie dokumentu elektronicznego za pośrednictwem portalu e-Budownictwo. Zgodnie z art. 60h. ust. 1. Książkę obiektu budowlanego zakłada się i prowadzi w postaci elektronicznej w systemie e-KOB. Zgodnie z Art. 88 a ust. 1. p.3, główny inspektor nadzoru budowlanego prowadzi w systemie e-CRUB centralne rejestry osób posiadających uprawnienia budowlane.

5. Podsumowanie

Synergia pomiędzy projektowaniem parametrycznym, technologiami BIM i identyfikacją cyfrową sprzyja poprawie bezpieczeństwa, skróceniu cyklu realizacji oraz zwiększeniu efektywności procesów budowlanych. Wskazuje to na rosnące znaczenie technologii identyfikacji cyfrowej jako niezbędnego elementu procesów budowlanych, zorientowanych na wdrażanie BIM, automatyzację, ułatwienie montażu, inteligentne monitorowanie prac w czasie rzeczywistym i ograniczenie strat materiałowych, a także rosnące znaczenie cyfryzacji procesów budowlanych jako niezbędnego elementu współczesnego placu budowy, w którym możliwe jest inteligentne monitorowanie zasobów, kontrola jakości oraz precyzyjny harmonogram działań uwzględniający pojawiające się zmienne. Wykorzystanie BIM

i kodów QR przynosi poprawę interakcji uczestników procesu budowlanego i zwiększa poziom bezpieczeństwa oraz wzajemnego zrozumienia na placu budowy [30]. Poprawia komunikację, jak również wspiera podejmowanie decyzji w warunkach wysokiego ryzyka. Dzięki wykorzystaniu modeli parametrycznych i BIM możliwe jest jednoczesne uwzględnianie aspektów konstrukcyjnych, estetycznych i ekologicznych, co sprzyja realizacji budynków zgodnych z zasadami zrównoważonego rozwoju. Wdrażanie nowoczesnych narzędzi cyfrowych, w tym śledzenie komponentów czy strategię AR-QR, stanowi wsparcie efektywności i precyzji montażu, a także podstawę strategii poprawy bezpieczeństwa na placu budowy ograniczając ryzyko powstawania niebezpiecznych zdarzeń. Pomimo licznych korzyści wdrażanie technologii cyfrowych związane jest z ograniczeniami, takimi jak wysokie koszty implementacji BIM i IoT, konieczność szkolenia personelu oraz problematyka integracji różnych platform cyfrowych. Dalsze badania powinny koncentrować się na ocenie efektywności ekonomicznej wdrożeń technologii cyfrowych oraz ich wpływie na redukcję liczby wypadków w długoterminowej perspektywie.

Artykuł powstał na podstawie referatu zamawianego, ogłoszonego podczas VI edycji Konferencji Naukowo-Technicznej pt. „Nowoczesne technologie w budownictwie-wybrane zagadnienia”, Łódź, 12–13.03.2026 r.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Li H., Lu, M., Hsu S.-C., Gray M. Huang T., Proactive Behavior-Based Safety Management for Construction Safety Improvement, *Safety Science* 75, 2015, str. 107–117, doi:10.1016/j.ssci.2015.01.013
- [2] Park J., Kim K., Cho Y.K., Framework of Automated Construction-Safety Monitoring Using Cloud-Enabled BIM and BLE Mobile Tracking Sensors, *J. Constr. Eng. Manage.* 143, 2017, art. 05016019, doi:10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001223
- [3] Pereira F., González García M. D. L. N., Poças Martins J., BIM for Safety: Applying Real-Time Monitoring Technologies to Prevent Falls from Height in Construction. *Applied Sciences* 15, 2025, art. 2218, doi:10.3390/app15042218
- [4] Park J., Chen J., Cho Y. K., Self-Corrective Knowledge-Based Hybrid Tracking System Using BIM and Multimodal Sensors. *Advanced Engineering Informatics* 32, 2017, str. 126–138, doi:10.1016/j.aei.2017.02.001
- [5] Muchla A., Kurcusz M., Sutkowska M., Burgos-Bayo R., Koda E., Stefańska A., The Use of BIM Models and Drone Flyover Data in Building Energy Efficiency Analysis. *Energies* 18, 2025, art. 3225, doi:10.3390/en18133225
- [6] Guo K., Li Q., Zhang L., Wu X., BIM-Based Green Building Evaluation and Optimization: A Case Study. *Journal of Cleaner Production* 320, 2021, art. 128824, doi:10.1016/j.jclepro.2021.128824
- [7] Rodrigues F., Baptista J. S., Pinto D., BIM Approach in Construction Safety – A Case Study on Preventing Falls from Height, *Buildings* 12/2022, str. 73, doi:10.3390/buildings12010073
- [8] Liu P., Yu C., Liu Y. B., Citerne D., China Zun Tower: Pushing the Limits to Chinese Practice., Geneva, Switzerland, 2015, str. 1850–1858
- [9] Piętocha A., Koda E., Sustainable Design and Energy Efficiency in Supertall and Megatall Buildings: Challenges of Multi-Criteria Certification Implementation, *Energies* 19, 2025, str. 133, doi:10.3390/en19010133
- [10] Xu L., Citic Tower Construction Key Technology. *International Journal of High-Rise Buildings* 8/2019, str. 185–192, doi:10.21022/IJHRB.2019.8.3.185
- [11] Piętocha A., Li W., Koda E., The Vertical City Paradigm as Sustainable Response to Urban Densification and Energy Challenges: Case Studies from Asian Megacities. *Energies* 18, 2025, art. 5278, doi:10.3390/en18195278
- [12] Li J., Duan X., Liu H., Lei S., Zhang Z., Li Z., Key Technological Innovations in the Construction of the Main Terminal of Beijing Daxing International Airport. *Front. Eng. Manag.* 9/2022, str. 689–694, doi:10.1007/s42524-022-0223-3
- [13] Zhang S., Teizer J., Pradhananga N., Eastman C. M., Workforce Location Tracking to Model, Visualize and Analyze Workspace Requirements in Building Information Models for Construction Safety Planning. *Automation in Construction* 60, 2015, str. 74–86, doi:10.1016/j.autcon.2015.09.009
- [14] Ganah A. A., John G. A., BIM and Project Planning Integration for On-Site Safety Induction, *Journal of Engineering, Design and Technology* 15, 2017, str. 341–354, doi:10.1108/JEDT-02-2016-0012
- [15] Kim K., Cho Y., Zhang S., Integrating Work Sequences and Temporary Structures into Safety Planning: Automated Scaffolding-Related Safety Hazard Identification and Prevention in BIM, *Automation in Construction* 70, 2016, str. 128–142, doi:10.1016/j.autcon.2016.06.012
- [16] Takim R., Zulkifli M. H., Nawawi A. H., Integration of Automated Safety Rule Checking (ASRC) System for Safety Planning BIM-Based Projects in Malaysia. *Procedia – Social and Behavioral Sciences* 222, 2016, str. 103–110, doi:10.1016/j.sbspro.2016.05.195
- [17] Daniel E. I., Oshodi O. S., Nwankwo N. I., Emuze F. A., Chinyio E., The Use of Digital Technologies in Construction Safety: A Systematic Review, *Buildings* 15, 2025, art. 1386, doi:10.3390/buildings15081386
- [18] Zhang Y., Xie Y., Yue F., Liu F., Mai Y., Huang Z., Intelligent BIM-Based Monitoring of Construction Tower Cranes. In *Proceedings of the 26th International Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate*, Guo H., Fang D., Lu W., Peng Y., Eds., Lecture Notes in Operations Research; Springer Nature Singapore: Singapore, 2022, str. 109–126 ISBN 978-981-19-5255-5
- [19] Tran S. V.-T., Khan N., Lee D., Park C., A Hazard Identification Approach of Integrating 4D BIM and Accident Case Analysis of Spatial-Temporal Exposure. *Sustainability* 13, 2021, art. 2211, doi:10.3390/su13042211
- [20] Manzoor B., Charef R., Antwi-Afari M. F., Alotaibi K. S., Harirchian E., Revolutionizing Construction Safety: Unveiling the Digital Potential of Building Information Modeling (BIM), *Buildings* 15, 2025, art. 828, doi:10.3390/buildings15050828
- [21] Mishra A., Mathuria M., A Review on QR Code. *IJCA* 164, 2017, str. 17–19, doi:10.5120/ijca2017913739
- [22] Benito-Altamirano I., Martínez-Carpena D., Lizarzaburu-Aguilar H., Fàbrega C., Prades J. D., Reading QR Codes on Challenging Surfaces Using Thin-Plate Splines. *Pattern Recognition Letters* 184, 2024, str. 37–43, doi:10.1016/j.patrec.2024.06.004
- [23] Su H., Niu J., Liu X., Atiquzzaman M., SafeCoder: A Machine-Learning-Based Encoding System to Embed Safety Identification Information into QR Codes. *Journal of Network and Computer Applications* 227, 2024, art. 103874, doi:10.1016/j.jnca.2024.103874
- [24] Foroughi Sabzevar M., Gheisari M., Lo L. J., Integrating the AR-QR Code Approach with Positioning and Orientation Sensors to Facilitate Deploying Drawings Information on Job Sites., Lille, France, June 3, 2024
- [25] Foroughi Sabzevar M., Gheisari M., Lo L. J., AR-QR Code for Improving Crew Access to Design and Construction Information. *Automation in Construction* 154, 2023, art. 105017, doi:10.1016/j.autcon.2023.105017
- [26] Van Groesen W., Pauwels P., Tracking Prefabricated Assets and Compliance Using Quick Response (QR) Codes, Blockchain and Smart Contract Technology. *Automation in Construction* 141, 2022, art. 104420, doi:10.1016/j.autcon.2022.104420
- [27] Koenen J., Why QR codes are a natural fit for construction, *Medium*, May 2, 2021, <https://medium.com/the-jobsite/why-qr-codes-are-a-natural-fit-for-construction-9b45c0f4370a> (dostęp 28.02.2026)
- [28] Guihong W., Zhuliang H., Yantian Port East International Container Terminal Co., Ltd. Application of New Technologies in Construction Safety Management of Yantian Port. *Port & Waterway Engineering* 2025, str. 271–276, doi:10.16233/j.cnki.issn1002-4972.20250311.033
- [29] 草料二维码生成器：中建三局借助二维码管理现场，人员、设备、物资等应用方案 Generator kodów QR Caoliao: wykorzystanie kodów QR do zarządzania personelem, sprzętem i materiałami na budowie]. (n.d.). cli.im. <https://cli.im/client/detail/1766> (dostęp 28.02.2026)
- [30] Vasilyev R. S., Losev K. Y., Cheprasov A. G., Bektash D. T., BIM and QR-Codes Interaction on a Construction Site, *J. Phys.: Conf. Ser.* 1425, 2019, art. 012089, doi:10.1088/1742-6596/1425/1/012089

Przykłady problemów technicznych związanych z realizacją czasowo przerwanych inwestycji budowlanych

Examples of technical problems related to the implementation of temporarily interrupted construction investments

dr hab. inż. Barbara Francke, prof. SGGW (ORCID: 0000-0001-9525-5468), mgr inż. Konrad Tracz, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7923

Streszczenie: W artykule przeanalizowano problemy techniczne związane z kontynuacją przerwanych na kilka lat inwestycji, ze szczególnym uwzględnieniem części podziemnych przeznaczonych na garaże. Zwrócono uwagę na zawilgocenie konstrukcji niezabezpieczonej przez dłuższy czas przed wnikaniem wody i wilgoci. Na przykładzie wybranego obiektu przeanalizowano przykładowe usterki wymagające napraw przed przystąpieniem do dalszej budowy. Zaproponowano sposoby ich usunięcia z zastrzeżeniem, że nie są to rozwiązania uniwersalne i każdorazowo wymagają indywidualnego wyboru w zależności od stwierdzonego stanu technicznego przejmowanego obiektu.

Słowa kluczowe: kontynuacja realizacji przerwanych inwestycji, usterki techniczne zawilgoconych konstrukcji podziemnych, metody napraw.

Abstract: The article analyses technical problems encountered in continuing the implementation of investments that had been interrupted for several years, with particular emphasis on the underground sections intended for garages. Attention was paid to the dampness of the structure, which has not been protected against water and moisture penetration for a long time. Using the example of a selected object, defects requiring repair before further construction were analysed. Methods for their removal have been proposed, with the proviso that these are not universal solutions and that each case requires an individual choice based on the building's technical condition.

Keywords: continuation of the implementation of interrupted investments, technical defects of damp underground structures, repair methods.

1. Wprowadzenie

Rozwój cywilizacyjny, ściśle związany z rozbudową obszarów miejskich i rozwojem terenów zurbanizowanych, wymusza na architektach i urbanistach optymalizację przestrzeni miejskiej i przemysłane rozwiązania zapewniające odpowiednią funkcjonalność, uwzględniając zarówno wymagania techniczne, jak i estetyczne. Koszt działek budowlanych, zwłaszcza w centralnych punktach dużych miast stale rośnie, podobnie jak koszty budowy związane z rosnącymi cenami materiałów budowlanych oraz robocizny. Błędnie skalkulowane koszty takich realizacji czasami przerastają możliwości finansowe inwestorów i w efekcie skutkują przerwaniem rozpoczętego cyklu budowlanego do momentu przejęcia realizacji przez kolejną firmę, posiadającą stosowane fundusze na jej zakończenie. Oczywiście każda taka zmiana wymaga wcześniejszej oceny stanu technicznego przejmowanej budowy w celu ustalenia ewentualnego ryzyka związanego z jej kontynuacją. Niejednokrotnie może okazać się, że koszty naprawy wzniesionych fragmentów przejmowanego obiektu, narażonych na niszczenie podczas przedłużającego się przestoju w realizacji prac, są wyższe od kosztu wyburzenia i ponownego rozpoczęcia

inwestycji. Najczęściej problemem jest znaczne zawilgocenie konstrukcji niezabezpieczonej w sposób skuteczny przed działaniem czynników atmosferycznych, ze szczególnym uwzględnieniem części podziemnej budynku, zazwyczaj przeznaczonej na parkingi podziemne i niestety szczególnie podatnej na kumulację wody opadowej [1, 2]. Parkingi pod budynkami mieszkalnymi, biurowcami czy centrami handlowymi stały się już bowiem standardem w nowoczesnym budownictwie. W niniejszym artykule omówiono przykładowe i tylko niektóre z licznych problemów technicznych, z jakimi można się spotkać podczas realizacji budowy po okresowym przerwaniu prac, prezentując je na przykładzie kompleksu budynków mieszkalnych, budowę którego przerwano na okres około 3 lat. Ze względu na rozległość tematu w przykładach przedstawionych poniżej skupiono się jedynie na wybranych problemach związanych z dalszą realizacją części podziemnych przeznaczonych na garaże podziemne.

2. Charakterystyka inwestycji

2.1. Krótki opis założeń projektowych inwestycji

Przedmiotowy obiekt to budynek mieszkalny, wielorodzinny

o zmiennej liczbie kondygnacji: nadziemnych od 10 do 12 i podziemnych od 1 do 2, przy czym do garażu zaprojektowano jeden wjazd. W rzucie budynek ma kształt zbliżony do odwróconej litery „S” o powierzchni zabudowy około 75x160 m. Budynek zaprojektowano w technologii mieszanej – żelbetowo-monolitycznej w systemie płytowo-żebrowo-słupowym w części podziemnej i szkieletowo-monolitycznej w części nadziemnej, o rozpiętościach konstrukcyjnych wynoszących od 3,5 m do 7,5 m, ze ścianami zewnętrznymi murowanymi z pustaków ceramicznych Porotherm. Szywność przestrzenną budynku zapewniają ściany żelbetowe trzonów komunikacyjnych, nośne ściany żelbetowe wzdłuż dylatacji, a także żelbetowe słupy główne i filary. Płyty fundamentowe i ściany zaprojektowano w technologii tzw. białej wanny, tzn. z betonu o stopniu wodoszczelności W8, (czyli nieprzepuszczającym wody przy ciśnieniu 0,8 MPa), podzielone 4 dylatacjami konstrukcyjnymi, uszczelnionymi taśmami dylatacyjnymi z PVC. Dodatkowe założenia odnośnie do składników mieszanki betonowej były następujące:

- zawartość cementu do 350 kg/m³, przy obowiązkowym stosowaniu plastifikatorów, a w razie potrzeby również opóźniaczy wiązania; na płytach fundamentowych – cement hutniczy CEM III/A, zaś na stropach i słupach – cement CEM II/BS,
- wskaźnik w/c ≤ 0,45.

Na podstawie badań geotechnicznych wykonanych podczas projektowania budynku w rejonie jego posadowienia stwierdzono występowanie glin i glin piaszczystych z soczewkami piasków średnich. Poziom swobodnego zwierciadła wody gruntowej zaobserwowano na głębokości ok. 5,0 m poniżej poziomu terenu w zamkniętej soczewce piaszczystej, co w rejonie dwóch kondygnacji podziemnych może wiązać się z posadowieniem w obrębie wód gruntowych. Stwierdzono również lokalne występowanie sączer z przewarstwień piaszczystych występujących wśród glin morenowych.

2.2. Analiza stanu technicznego obiektu w momencie przejmowania go przez drugiego inwestora

Pierwszy inwestor prowadził roboty budowlane przez 4 lata, w ciągu których uzyskano około 50% zaawansowania budynku, z różnym poziomem w zależności od miejsca realizacji, tzn.:

- na całości obiektu wzniesiono części podziemne, lecz miejscowo – na około 1/8 inwestycji – bez stropu międzykondygnacyjnego podziemia/parteru,
- na 3/8 budynku wykonano stan surowy otwarty aż do poziomu piątej kondygnacji nadziemnej,
- na 1/2 obiektu wykonano stan surowy zamknięty łącznie z pokryciem dachowym 1/4 ww. konstrukcji.

W momencie przejmowania inwestycji w kondygnacjach podziemnych zalegała woda o różnym poziomie lustra, co zdecydowanie utrudniało ocenę stanu technicznego wykonanych robót, lecz po jej odpompowaniu stwierdzono następujące nieprawidłowości:

- miejscowe odsłonięcie zbrojenia na słupach konstrukcyjnych, oraz w rejonie pochylni zjazdowej do garażu,
- miejscowe raki powierzchniowe i wykwyty solne oraz ubytki betonu na krawędziach konstrukcji,
- miejscowe pęknięcia stropu międzykondygnacyjnego podziemie/parter,
- nieszczelności w obrębie dylatacji konstrukcyjnych oraz w przerwach roboczych zarówno na połączeniach płyty dennej ze ścianami części podziemnych oraz w obniżeniach podszybi windowych,
- wycieki wody przez niezabezpieczone otwory po ściągach szalunkowych, o rdzawym zabarwieniu wskazującym na obecność produktów korozji zbrojenia.

Przykłady powyższych usterek przedstawiono na rysunku 1: miejscowe ubytki betonu wraz ze skorodowanym zbrojeniem (a), rysy w stropie nad garażem z aktywnym przeciekiem (b), uszkodzenie słupa z odsłoniętym zbrojeniem (c), odsłonięte zbrojenie w przerwie roboczej pochylni zjazdowej (d), nawisy solne w przerwie roboczej stropu pośredniego (e), wycieki wody z otworów po ściągach szalunkowych z zabarwieniem wskazującym na korozję zbrojenia (f), nieszczelność połączenia ściany zewnętrznej i stropu pośredniego w poziomie -2 (g), rysy w narożniku ściany zewnętrznej z wykwitami solnymi i aktywnym wyciekami wody (h), zacieki w podszybiu windowym (i), przeciek w dylatacji (j).

Oprócz oględzin obiektu uznano za wskazane sprawdzenie jakości betonu, z którego wykonano konstrukcję części podziemnej budynku, pobierając w tym celu próbki rdzeniowe, zgodnie z wymaganiami norm: PN-EN 13791:2019-12 [3] (wytypowano punkty pomiarowe) i PN-EN 12504-1:2019-08 [4] (wykonano odwierty). Następnie próbki przewieziono do laboratorium, w którym zbadano wytrzymałość betonu na ściskanie (według PN-EN 12390-3:2019-07 [5]), oraz przepuszczalność wody przez beton (według PN-B-06250: 1998 [6]). W efekcie ww. badań ustalono, że:

- średnia wartość wytrzymałości na ściskanie betonu pobranego z płyty fundamentowej wynosi 57,96 MPa (określona na 6 próbkach rdzeniowych o wymiarach: wysokości 72–74 mm i średnicy 74 mm),
- średnia gęstość objętościowa wynosi 2252 kg/m³ (określona na podstawie 6 próbek),
- stopień wodoszczelności betonu pobranego z płyty fundamentowej i ścian części podziemnych budynku określono na poziomie W8 (w badaniu na próbkach rdzeniowych o wymiarach: wysokość 150 mm i średnica 150 mm, po 3 próbki pobrane z płyty fundamentowej i ze ścian zewnętrznych).

Wysoka wytrzymałość i wodoszczelność betonu potwierdziły jakość pozwalającą na dalsze kontynuowanie inwestycji bez potrzeby rozbiórki. Uznano, że podczas dalszych prac niezbędna jest likwidacja stwierdzonych uszkodzeń konstrukcji i występujących w tym rejonie przecieków, wynikających z błędów wykonawczych popełnionych w tzw.

miejskach newralgicznych dla konstrukcji „białej wanny”, tzn. w dylatacjach konstrukcyjnych, w przerwach roboczych w betonowaniu, w uszczelnieniach miejsc przejść instalacyjnych oraz niewłaściwym zabezpieczeniu obszarów w miejscach przerwania robót budowlanych.

3. Kolejne etapy realizacji prac ze szczególnym uwzględnieniem prac naprawczych

Ze względu na długotrwały okres pozostawienia obiektu na niszczanie w efekcie działania środowiskowych czynników eksploatacyjnych przed przystąpieniem do kontynuacji realizacji inwestycji niezbędne było odtworzenie frontu robót. Działania te można określić mianem prac przygotowawczych. Rozpoczęto je od odpompowania dotychczas nieusuniętej wody z posadzek garażowych, stosując w tym celu pompy zatapialne, zamontowania tymczasowego oświetlenia kondygnacji podziemnych oraz skutecznego osuszenia konstrukcji. Osuszanie ścian i stropów prowadzono z wykorzystaniem nagrzewnic sorpcyjnych, nie zapominając jednocześnie o zapewnieniu skutecznej wentylacji ogrzewanych przestrzeni, stosując w tym celu wentylatory przemysłowe.

Dopiero po ww. pracach przygotowawczych można było przystąpić do realizacji kolejnego etapu budowy, zaczynając od napraw uszkodzonych fragmentów konstrukcji oraz zabezpieczeń wodochronnych jej miejsc newralgicznych. Część wykonanych robót naprawczych można sklasyfikować również w grupie prac przygotowawczych, gdyż pełniły dwie funkcje, tzn. umożliwiającą realizację dalszych etapów robót oraz skutecznie ograniczającą wnikanie wody do wnętrza części podziemnej budynku. Do takich robót należało m.in. wykonanie uszczelnień aktywnych wycieków wody przez konstrukcję betonową, za pomocą



Rys. 1. Przykładowe uszkodzenia konstrukcji części podziemnej budynku stwierdzone w momencie przejmowania obiektu przez drugiego inwestora, opis w tekście (fot. własne)



Rys. 2. Przegrody separacyjne wykonane z cementowej zaprawy szybkowiążącej (fot. własna)

szybkowiążącej zaprawy cementowej, tworząc tym samym czasowe przegrody dające szansę na ocenę szczelności obszarów sąsiednich (rys. 2).

Prace uszczelniające prowadzono po zabezpieczeniu konstrukcji przed dalszym wnikaniem wód opadowych poprzez strop zamykający nad kondygnacją -1 oraz prowizoryczne, czasowe uszczelnienia ścian i stropów kondygnacji podziemnej. Małe otwory, z których sączyła się woda, zaślepiono zaprawami do uszczelniania przecieków na bazie cementu, a w rejonie dylatacji i w miejscach dużych otworów (głównie przeznaczonych do osadzenia wpustów) wyklejono pasy papy podkładowej z asfaltową masą powłokową modyfikowaną SBS na osnowie z włókniiny poliestrowej. Równolegle oczyszczono otwory po ściągach szalunkowych i zamknięto je specjalnymi korkami z włóknoconu, wklejając je za pomocą kleju o właściwościach tiksotropowych. Zastosowany klej charakteryzował się przyczepnością do betonu na poziomie co najmniej 5 N/mm^2 , czyli wyższą od wytrzymałości betonu na rozciąganie. Pozostałe miejsca nieskutecznie uszczelnione przed przerwaniem realizacji inwestycji, tzn. przeciekające otwory po ściągach z wklejonymi korkami, uszczelniono żywicą poliuretanową o gęstości ok. $1 \text{ g/cm}^3 \pm 10\%$, niskiej lepkości $< 200 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ i wytrzymałości na rozciąganie $< 1 \text{ N/mm}^2$.

W kolejnym etapie prac przystąpiono do napraw konstrukcji żelbetowej, zwracając uwagę zarówno na pręty zbrojeniowe, jak też powierzchnie betonowe. W miejscach widocznego skorodowanego zbrojenia usunięto rdzę, zgorzelinę, pył, beton i inne luźne cząstki oraz zanieczyszczenia wpływające na przyczepność, odsłonięto elementy stali zbrojeniowej do miejsc nieskorodowanych, oczyszczono stal zbrojeniową drucianą szczotką lub piaskowaniem i pokryto zaprawą na bazie cementu zawierającą inhibitor korozji, pełniącą również funkcję warstwy szcpej. Równolegle z ww. pracami wykonano hydropiaskowanie powierzchni betonowych by usunąć luźne fragmenty betonu oraz inne zanieczyszczenia zalegające na jego powierzchni. Wodę,

która była elementem ubocznym hydropiaskowania, wypompowano lub wydmuchano sprężarką. Miejsce styku starego betonu z nowym jako potencjalny obszar możliwych nieszczelności pokryto warstwą szcpej z zaprawy cementowo-polimerowej z dodatkiem mikrokrzemionki nanosząc ją metodą natrysku. Zastosowana zaprawa szcpej charakteryzowała się wysoką przyczepnością do betonu, o wartościach powyżej 5 N/mm^2 oraz wysoką wytrzymałością na ściskanie, powyżej 45 MPa . Wystające z konstrukcji żelbetowej startery zbrojeniowe dodatkowo zabezpieczono powłoką antykorozyjną zaś w rejonie wystających fragmentów blach szczelinowych, dotychczas niepokrytych betonem wklejono akrylowe, pęczniące profile uszczelniające z wyrobów zwiększających swoją objętość w kontakcie z wodą o około 50% po pierwszym dniu i 130% po 7 dniach (do 150% po 30 dniach) i ciśnieniu pęcznienia powyżej 10 bar.

W miejscach występowania raków i ubytków na powierzchni betonu, usunięto luźne fragmenty i wykonano reprofiliację przy zastosowaniu zapraw naprawczych typu PCC o właściwościach zgodnych z normą PN-EN 1504-3:2006 [7] dla zapraw klasy R4 do napraw betonu, o następujących podstawowych właściwościach:

- wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach $\geq 45 \text{ MPa}$,
- module sprężystości przy ściskaniu po 28 dniach $\geq 20 \text{ GPa}$,
- przyczepności do betonu zgodnie z PN-EN 1766 $\geq 2 \text{ MPa}$.

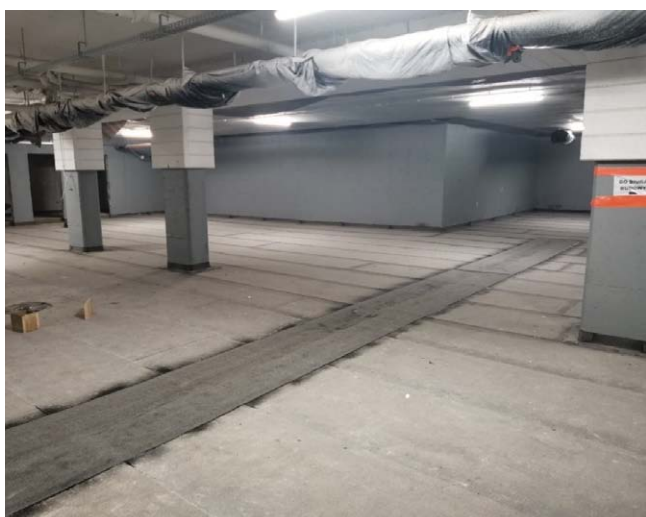
W miejscu pęknięć konstrukcji betonowej zaproponowano zastosowanie rozwiązań opracowanych specjalnie dla tego konkretnego przypadku (według PN-EN 1504-5:2013-09 [8]). Przyjęto, że zarysowania płyty fundamentowej, ścian zewnętrznych oraz styków ścian ze stropem można wykonać dwiema metodami:

- w rejonie bez widocznych sączeń wody – metodą iniekcji akrylowym żelem o gęstości ok. $1 \text{ g/cm}^3 \pm 10\%$ i niskiej lepkości poniżej $0,05 \text{ mPa}\cdot\text{s}$. Taka charakterystyka oznacza, że żywica jest zdolna do głębokiej penetracji nawet w bardzo wąskie rysy rzędu $0,05 \text{ mm}$,
- w miejscach aktywnych przecieków – również metodą iniekcji jak w przypadku rejonu bez widocznych sączeń, lecz z aktywatorem przyspieszającym reakcję wiązania, co pozwoliło osiągnąć granicę płynności do ok. 120 sekund, a postać stałą do 180 sekund przy niskich temperaturach w granicy $+5^\circ\text{C}$ i 30-46 sekund dla temperatury $+20^\circ\text{C}$. Jest to rozwiązanie do szybkiego uszczelnienia aktywnych wycieków wody pod ciśnieniem, dzięki czemu iniekt nie zostanie wypłukany, wymaga jednak dużego doświadczenia, sprawnego sprzętu oraz precyzyjnego planowania w konkretnych przypadkach. Wspomniana żywica charakteryzuje się również wytrzymałością na rozciąganie rzędu $0,2 \text{ N/mm}^2$ oraz wysoką wartością wydłużenia co umożliwia skuteczne uszczelnienie nawet przy niewielkiej pracy konstrukcji mogącej doprowadzić do ponownego pęknięcia sztywnego materiału.

W części garaży podziemnych wzniesionych w pierwszym etapie robót, po usunięciu wody stwierdzono brak spadków

na powierzchni posadzki. By skutecznie odprowadzać wody nanoszone do wnętrza pomieszczeń na kołach pojazdów, po oczyszczeniu i wyreperowaniu powierzchni podkładu ułożono warstwę betonu spadkowego klasy C16/20 S3 X0 W8, profilując pochylenie od 0,5 do 2%, w kierunku miejsc osadzenia wpustów. Do uzyskania wymaganej przyczepności nowej warstwy do „starego” betonu zastosowano pomiędzy nimi warstwę szepną. Ułożone warstwy sezonowano przez kolejne 28 dni.

Powierzchnię płyty betonowej międzykondygnacyjnego stropu garażowego istniejącego w obszarze z dwiema kondygnacjami garażowymi, w poziomie -1 zabezpieczono jedną warstwą papy asfaltowej modyfikowanej SBS na osnowie z włókniny poliestrowej, wywijając ją na ściany garażu i słupy na wysokość min. 25 cm (rys. 3). Papę układano po wcześniejszym wyschnięciu bitumicznego roztworu gruntującego naniesionego na całej powierzchni przewidzianej do jej klejenia. Górną krawędź papy na ścianach zakończono w wydrze, zaś na słupach stosując specjalne ściągę i dodatkowo okitowano kitem trwale plastycznym.



Rys. 3. Hydroizolacja z papy asfaltowej na posadzce kondygnacji -1 (fot. własna)

Powierzchnię stropu nad garażami podziemnymi oczyszczono, a po wysuszeniu do min. 5% wilgotności zagruntowano preparatem bitumicznym i zabezpieczono podwójną warstwą papy termozgrzewalnej na osnowie z włókniny poliestrowej z masą powłokową modyfikowaną SBS z wywinięciem min. 0,5 m na ścianę. Podczas układania papy pomiędzy warstwami wklejono kołnierze systemowych wpustów z papy termozgrzewalnej, by zapewnić skuteczne odprowadzenie wody z powierzchni warstwy hydroizolacyjnej do wnętrza rur spustowych i dalej do zbiorników retencyjnych.

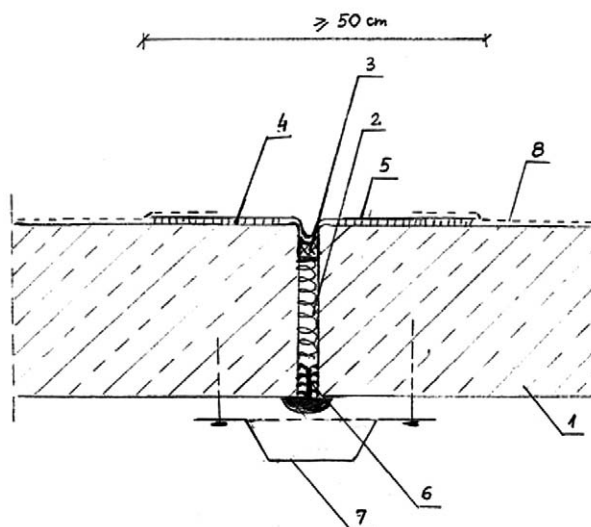
Nie lada wyzwaniem okazała się naprawa wszystkich przeciekających przerw roboczych i dylatacji konstrukcyjnych. O ile prawidłowe uszczelnienie przerw roboczych i dylatacji konstrukcyjnych na etapie budowy wymaga jedynie

prawidłowego osadzenia w tych obszarach wyrobów uszczelniających, o tyle po wylaniu betonu osadzenie taśm dylatacyjnych jest praktycznie niemożliwe. Niestety, autorzy artykułu nie dotarli do rozwiązań dylatacyjnych rzeczywiście zastosowanych na przedmiotowym obiekcie. W związku z powyższym na rysunkach 4 i 5 zaproponowali własne rozwiązanie możliwe do wykorzystania w podobnej sytuacji technicznej.

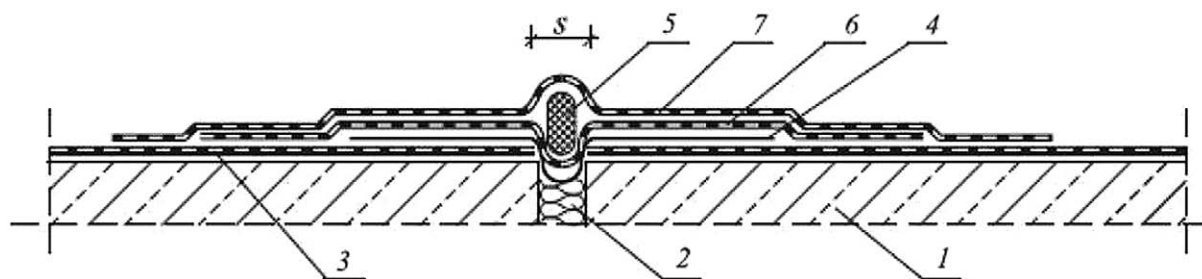
W przeciekające przerwy robocze w obrębie płyty fundamentowej zalecono wysypanie cementowego preparatu do stopowania przecieków wody, w efekcie działania którego powinno nastąpić osuszenie wytworzonej szczeliny, ze względu na silną reakcję egzotermiczną zachodzącą w kontakcie ww. środka z wodą. Następnie zaleca się wypełnić istniejącą szczelinę materiałem ściśliwym, zaś szczyt szczeliny uzupełnić dodatkowo kitem trwale plastycznym. Powierzchnię betonu wokół przerwy roboczej, pasem o szerokości około 0,5 m po obu stronach szczeliny, należy pokryć zaprawą z wyrobów krystalizujących w porach betonu, a po jej wyschnięciu podłoże zagruntować roztworem asfaltowym i ułożyć izolację z papy asfaltowej modyfikowanej SBS na osnowie poliestrowej.

W odniesieniu do stropu międzykondygnacyjnego garażu podziemnego zaproponowano uszczelnienie dylatacji konstrukcyjnych zgodnie z rozwiązaniem przedstawionym na rysunku 4.

Rozwiązanie dylatacji konstrukcyjnej stropu nad garażem podziemnym zaproponowano zgodnie z rysunkiem 5. W stropie nad garażem zaleca się wykonać dodatkowe zabezpieczenie z wkładki dylatacyjnej z tworzywa bitumodpornego oraz wkładki rozprężnej ze spienionego tworzywa (rys. 5).



Rys. 4. Detal uszczelnienia dylatacji stropu pośredniego (1 – płyta stropowa, 2 – wypełnienie dylatacji materiałem ściśliwym, 3 – kitem elastycznym, 4 – klej systemowy do kauczuku EPDM, 5 – taśma wykonana z kauczuku EPDM, 6 – kształtka z tworzywa sztucznego lub kitem, 7 – dodatkowa rynienka z blachy lub tworzywa sztucznego, 8 – powłoka hydroizolacyjna) [9]



Rys. 5. Rozwiązanie uszczelnienia dylatacji płyty stropowej nad garażem (1 – podłoże betonowe, 2 – wypełnienie dylatacji – materiał ściśliwy, na przykład wełna mineralna, 3 – warstwy hydroizolacyjne z pap asfaltowych, 4 – wkładka dylatacyjna z tworzywa bitumoodpornego, 5 – wkładka rozprężna ze spienionego tworzywa, 6 – papa asfaltowa na osnowie poliestrowej klejona na całej powierzchni, 7 – papa asfaltowa na osnowie poliestrowej klejona do podłoża z wyjątkiem obszaru nad szczeliną dylatacyjną oznaczonego s, s – szczelina dylatacyjna [9])

Uszczelnianie dylatacji pionowych remontowanych konstrukcji z betonu o stopniu wodoszczelności min. W8 zaleca się wykonywać od strony zewnętrznej, tzn. po odkopaniu ścian fundamentowych. W przypadku braku dostępu do dylatacji od strony naporu wody, autorzy uważają, że naprawę można również wykonać od strony wnętrza pomieszczeń garażowych. W obu przypadkach po odsłonięciu miejsca dylatacji zaleca się montaż systemowej taśmy dylatacyjnej z tworzywa sztucznego lub kauczuku, w drodze klejenia jej na powierzchni podłoża (a nie jak tradycyjnie przyjęto w centralnej części przekroju lub pod płytą denią), wzdłuż obu krawędzi dylatacji, stosując w tym celu klej na bazie żywic epoksydowych. Wiązanie takiego kleju z reguły trwa od 1 godziny przy temperaturze 20°C do 3 godzin przy 5°C. Zaleca się stosowanie taśm o maksymalnym naprężeniu rozciągającym co najmniej 11 MPa, wydłużeniu przy maksymalnym naprężeniu powyżej 275%. W wariancie wewnętrznym powinno się zacząć od zastopowania aktywnego wycieku wody, jeżeli taki występuje, stosując preparaty cementowe do stopowania przecieków wody, a następnie osuszyć uszczelnianą powierzchnię. Zarówno w przypadku klejenia taśmy od strony zewnętrznej ściany, jak też od strony wnętrza pomieszczenia, po oczyszczeniu powierzchni, na której będzie ona układana, po obu stronach uszczelnianej szczeliny należy równomiernie nałożyć warstwy kleju za pomocą pacy ząbkowanej 4 mm, na szerokości minimum 12,5 cm po każdej stronie dylatacji i grubości w najcieńszym miejscu rzędu 2 mm. Następnym krokiem jest przyklejenie ww. taśmy na przygotowanej spoinie klejowej. W celu zwiększenia przyczepności korzystne jest dodatkowe powierzchniowe dociśnięcie taśmy do podłoża, wykorzystując w tym celu gumową rolkę. W przypadku napraw wykonywanych po zewnętrznej stronie ściany przed jej zasypywaniem korzystne jest zabezpieczenie uszczelnianej powierzchni, np. warstwą folii kubełkowej lub płytami z polistyrenu ekstrudowanego (XPS).

4. Podsumowanie

Kontynuacja prac budowlanych po dłuższej przerwie w ich realizacji jest procesem złożonym, pełnym wyzwań

i wymagającym koordynacji wielu stron: projektantów, konstruktorów i wykonawców robót. Nie można bowiem zapominać, że niewykończony obiekt budowlany przez dłuższy czas narażony na działanie czynników atmosferycznych ulega sukcesywnej destrukcji i w warunkach klimatycznych Polski procesy te przyspieszane są przez obecność wody i wilgoci. Zakres prac naprawczych każdorazowo powinien być ustalony po dokładnej analizie stanu istniejącego dokonanej metodą przeglądu obiektu, uzupełnionego o niezbędne badania laboratoryjne pobranych próbek. Należy zauważyć, iż w każdym przypadku potencjalny zakres napraw należy dostosować do istniejącego przypadku i nie ma w tym zakresie jednego uniwersalnego rozwiązania. Kwestie ekonomiczne są również istotne przy wyborze rozwiązań technicznych przewidzianych zarówno do naprawy stwierdzonych uszkodzeń, jak też do dalszej kontynuacji rozpoczętych robót. Jest to temat bardzo rozległy i wymaga szczegółowych analiz, których nie przewidziano w niniejszym artykule.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Francke B., Nowoczesne hydroizolacje budynków. Zabezpieczenia wodochronne części podziemnych budynków. Zeszyt 1, Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2021, str. 16
- [2] Henshell J., The manual of below-grade waterproofing, 2nd ed., Routledge, 2016
- [3] PN-EN 13791:2019-12: Ocena wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcjach i prefabrykowanych wyrobach betonowych
- [4] PN-EN 12504-1:2019-08: Badania betonu w konstrukcjach – Część 1: Próbkę rdzeniowe – Pobieranie, ocena i badanie wytrzymałości na ściskanie
- [5] PN-EN 12390-3:2019-07: Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań
- [6] PN-B-06250:1988: Beton zwykły
- [7] PN-EN 1504-3:2006: Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Definicje, wymagania, sterowanie jakością i ocena zgodności. Część 3: Naprawy konstrukcyjne i niekonstrukcyjne
- [8] PN-EN 1504-5:2013-09: Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Definicje, wymagania, sterowanie jakością i ocena zgodności. Część 5: Iniekcja betonu
- [9] Francke B., Naprawa dylatacji i uszczelnianie konstrukcji żelbetowych, XXXVII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Wisła, 2023

Zastosowanie metod wizji komputerowej i głębokiego uczenia w segmentacji uszkodzeń elementów konstrukcyjnych betonowych

Application of computer vision and deep learning methods in segmentation of damage in concrete structural elements

dr hab. Roman Tracz, prof. SGGW (ORCID: 0000-0001-6654-9870), mgr inż. Volodymyr Tyvoniuk (ORCID: 0000-0001-9701-9346), dr inż. Tomasz Wierzbicki (ORCID: 0000-0002-4310-8789), Instytut Inżynierii Lądowej, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7924

Streszczenie: W artykule przedstawiono zastosowanie metod wizji komputerowej oraz głębokiego uczenia w zadaniu segmentacji odprysków w elementach konstrukcyjnych betonowych. Pomimo dynamicznego rozwoju metod segmentacji obrazu, w literaturze nadal brakuje kompleksowych analiz porównawczych modeli w kontekście segmentacji nieregularnych defektów, takich jak odpryski betonu. W badaniu przeanalizowano skuteczność wybranych modeli segmentacyjnych, w tym DeepLabV3+, YOLO (warianty seg), U-Net oraz HRNet. Analizę przeprowadzono na zbiorze 138 obrazów przedstawiających uszkodzenia betonu, podzielonym na zbiory treningowe i testowe. Modele oceniono przy użyciu standardowych metryk, takich jak Intersection over Union (IoU), Dice coefficient, precision, recall oraz F1-score. Uzyskane wyniki wskazują na wyraźną przewagę modelu DeepLabV3+, który osiągnął najwyższe wartości metryk jakościowych, w tym IoU = 0,709 oraz Dice = 0,825. Wyniki potwierdzają, że zaawansowane architektury segmentacyjne mogą znacząco zwiększyć dokładność i obiektywność identyfikacji uszkodzeń betonowych, stanowiąc podstawę do rozwoju zautomatyzowanych systemów diagnostycznych.

Słowa kluczowe: wizja komputerowa, segmentacja obrazu, DeepLabV3+, uszkodzenia betonu, diagnostyka konstrukcji.

Abstract: The article presents the application of computer vision and deep learning methods for the segmentation of spalling defects in concrete structural elements. Despite the dynamic development of image segmentation methods, there is still a lack of comprehensive comparative analyses of models in the context of segmenting irregular defects such as concrete spalling. The study evaluates the performance of selected segmentation models, including DeepLabV3+, YOLO (segmentation variants), U-Net, and HRNet. The analysis was conducted on a dataset of 138 images depicting concrete damage, divided into training and testing subsets. The models were assessed using standard evaluation metrics such as Intersection over Union (IoU), Dice coefficient, precision, recall, and F1-score. The results indicate a clear advantage of the DeepLabV3+ model, which achieved the highest performance values, including IoU = 0.709 and Dice = 0.825. The findings confirm that advanced segmentation architectures can significantly improve the accuracy and objectivity of concrete damage identification, providing a foundation for the development of automated diagnostic systems.

Keywords: computer vision, image segmentation, DeepLabV3+, concrete damage, structural diagnostics.

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach obserwuje się intensywny rozwój metod cyfrowych wspomagających diagnostykę oraz ocenę stanu technicznego elementów konstrukcyjnych, co jest bezpośrednio związane ze starzeniem się istniejącej infrastruktury, wzrostem obciążeń eksploatacyjnych oraz rosnącymi wymaganiami w zakresie bezpieczeństwa i niezawodności. W tym kontekście szczególnego znaczenia nabiera potrzeba wdrażania narzędzi umożliwiających szybką, obiektywną oraz skalowalną ocenę stanu konstrukcji, co przekracza możliwości tradycyjnych metod inspekcyjnych.

Jednym z kluczowych kierunków rozwoju w tym obszarze jest zastosowanie metod uczenia maszynowego (ML), które umożliwiają analizę dużych zbiorów danych oraz identyfikację złożonych zależności pomiędzy parametrami technicznymi, środowiskowymi i eksploatacyjnymi [1]. W szczególności ML znajduje zastosowanie w zadaniach związanych z identyfikacją uszkodzeń, oceną stanu technicznego oraz prognozowaniem degradacji konstrukcji w czasie.

W ramach tego podejścia szczególnie istotne są trzy podstawowe zadania wizji komputerowej: klasyfikacja, detekcja oraz segmentacja [2]. Klasyfikacja polega na przypisaniu całego obrazu do określonej kategorii na podstawie wyekstrahowanych

cech. Detekcja obiektów rozszerza to podejście poprzez lokalizację obiektów w obrazie, natomiast segmentacja umożliwia precyzyjny podział obrazu na regiony odpowiadające konkretnym elementom lub defektom.

Segmentacja obiektów stanowi jedno z kluczowych zagadnień w obszarze wizji komputerowej, szczególnie w kontekście analizy uszkodzeń materiałów budowlanych. W odróżnieniu od klasyfikacji i detekcji, których celem jest odpowiednio przypisanie obrazu do kategorii lub lokalizacja obiektów za pomocą ramek ograniczających (bounding boxes), segmentacja umożliwia przypisanie etykiety do każdego piksela obrazu. Dzięki temu możliwe jest precyzyjne odwzorowanie geometrii analizowanych obiektów, co ma kluczowe znaczenie w ocenie stopnia degradacji materiału [3].

W kontekście diagnostyki elementów betonowych segmentacja pozwala nie tylko na wykrycie obecności uszkodzenia, ale również na określenie jego rozmiaru, kształtu oraz lokalizacji. Informacje te są istotne z punktu widzenia oceny wpływu defektu na nośność i trwałość konstrukcji, a także w procesie podejmowania decyzji dotyczących naprawy lub wzmocnienia elementu. Wizja komputerowa jako dziedzina nauki oferuje szerokie możliwości zastosowań w inżynierii lądowej, obejmujące m.in. monitoring postępu prac budowlanych, analizę bezpieczeństwa na placu budowy, zarządzanie zasobami oraz inspekcję elementów konstrukcyjnych. Szczególnie istotne jest zastosowanie systemów wizyjnych do automatycznego wykrywania i lokalizacji defektów, co znacząco zwiększa efektywność oraz obiektywność procesu diagnostycznego [4].

Jednak pomimo dynamicznego rozwoju metod ML i wizji komputerowej, ich skuteczne zastosowanie w praktyce inżynierskiej napotyka szereg ograniczeń. Jednym z głównych problemów jest dostępność wysokiej jakości danych treningowych, które powinny być reprezentatywne, odpowiednio oznakowane oraz zróżnicowane pod względem warunków środowiskowych. W praktyce dane te często są niekompletne, zaszumione lub obarczone błędami, co wpływa na jakość trenowanych modeli. Równoległe z rozwojem metod analitycznych obserwuje się transformację sposobów pozyskiwania danych. Tradycyjne metody inspekcji, oparte głównie na wizualnej ocenie wykonywanej przez specjalistów, są czasochłonne, kosztowne oraz subiektywne [5]. W odpowiedzi na te ograniczenia rozwijane są nowoczesne technologie, takie jak skanowanie laserowe, fotogrametria czy monitoring z wykorzystaniem bezzałogowych statków powietrznych (UAV), które umożliwiają pozyskiwanie danych o wysokiej rozdzielczości i dokładności [6].

Z perspektywy aplikacyjnej systemy wizji komputerowej umożliwiają analizę dużych zbiorów danych wizualnych w krótkim czasie, co jest szczególnie istotne w przypadku rozległych obiektów konstrukcyjnych. Dodatkowo umożliwiają one prowadzenie analiz porównawczych pomiędzy różnymi cyklami inspekcji, co pozwala na identyfikację trendów degradacji oraz ocenę skuteczności działań naprawczych [7].

Elementy konstrukcyjne wykonane z betonu w trakcie eksploatacji podlegają różnorodnym procesom degradacyjnym, które

mogą prowadzić do pogorszenia ich właściwości mechanicznych, trwałości oraz bezpieczeństwa użytkowania. Charakter i intensywność tych uszkodzeń zależą od wielu czynników, takich jak warunki środowiskowe, jakość materiałów, technologia wykonania, a także sposób eksploatacji konstrukcji.

Do najczęściej występujących rodzajów uszkodzeń betonu należą: pęknięcia, odpryski, łuszczenie powierzchni, korozja zbrojenia, ubytki materiałowe oraz deformacje [8]. Każdy z tych typów uszkodzeń charakteryzuje się odmiennym mechanizmem powstawania oraz wpływem na stan techniczny konstrukcji. Szczególną kategorię uszkodzeń stanowią odpryski (spalling), które mają istotne znaczenie zarówno z punktu widzenia trwałości, jak i bezpieczeństwa konstrukcji. Odpryski definiowane są jako lokalne odspojenia fragmentów betonu od powierzchni elementu, często prowadzące do odsłonięcia zbrojenia [9]. Mechanizm ich powstawania jest złożony i może wynikać z różnych czynników, takich jak korozja zbrojenia, działanie wysokich temperatur, obciążenia dynamiczne czy procesy zamrażania i rozmrażania [10]. Jednocześnie odpryski stanowią istotne wyzwanie dla metod automatycznej detekcji opartych na wizji komputerowej [11]. W porównaniu z pęknięciami, które mają stosunkowo dobrze zdefiniowaną geometrię liniową, odpryski charakteryzują się nieregularnym kształtem, zróżnicowaną teksturą oraz dużą zmiennością wizualną. Granice są często rozmyte, a kontrast względem otaczającego betonu może być niewielki, szczególnie w warunkach naturalnego oświetlenia. Dodatkowym problemem jest podobieństwo wizualne odprysków do innych zjawisk powierzchniowych, takich jak zabrudzenia, przebarwienia czy ślady wilgoci. W konsekwencji klasyczne metody segmentacji mogą mieć trudności z ich poprawną identyfikacją oraz dokładnym wyznaczeniem granic. Celem niniejszej pracy jest porównawcza analiza skuteczności wybranych modeli głębokiego uczenia w zadaniu segmentacji odprysków w elementach betonowych. W ramach badań oceniono zdolność modeli do precyzyjnej identyfikacji nieregularnych defektów przy wykorzystaniu standardowych metryk jakościowych oraz przeprowadzono analizę ich właściwości w kontekście zastosowań inżynierskich.

2. Metodyka badań

Dobór analizowanych modeli został oparty na ich szerokim zastosowaniu w zadaniach segmentacji obrazu oraz reprezentowaniu różnych podejść architektonicznych. Uwzględniono zarówno modele segmentacji semantycznej (DeepLabV3+, U-Net, HRNet), jak i instancyjnej (YOLO w wariantach seg), co pozwala na kompleksową ocenę ich skuteczności w kontekście segmentacji nieregularnych defektów betonu. Wybrane modele różnią się złożonością, sposobem ekstrakcji cech oraz podejściem do odwzorowania granic obiektów, co umożliwia ich porównanie pod kątem dokładności i przydatności w zastosowaniach inżynierskich.

W badaniach wykorzystano sześć nowoczesnych poniższych modeli do segmentacji obiektów.

- DeepLabV3+ to zaawansowany model segmentacji semantycznej oparty na konwolucyjnych sieciach neuronowych, wykorzystujący atrous (dylatowane) konwolucje oraz moduł ASPP (Atrous Spatial Pyramid Pooling). Architektura typu encoder-decoder umożliwia uchwycenie zarówno kontekstu globalnego, jak i szczegółów lokalnych, co przekłada się na wysoką dokładność segmentacji obiektów o złożonej geometrii.
- YOLO26-seg stanowi rozwinięcie architektury YOLO dostosowane do zadań segmentacji instancyjnej. Model ten łączy szybkie wykrywanie obiektów z generowaniem masek segmentacyjnych, co umożliwia jednoczesną lokalizację i precyzyjne odwzorowanie obiektów. Charakteryzuje się wysoką wydajnością obliczeniową i jest przeznaczony do zastosowań czasu rzeczywistego.
- YOLO11-seg to nowsza iteracja modeli z rodziny YOLO, zoptymalizowana pod kątem równowagi między dokładnością a szybkością działania. Wprowadza ulepszenia w architekturze backbone oraz head sieci, co pozwala na bardziej stabilną segmentację obiektów o różnorodnych kształtach i rozmiarach, przy zachowaniu niskiego kosztu obliczeniowego.
- YOLOv8-seg jest jedną z najczęściej stosowanych wersji modeli YOLO w zadaniach segmentacji instancyjnej. Model ten wykorzystuje nowoczesną architekturę sieci neuronowej z ulepszonym mechanizmem ekstrakcji cech oraz predykcji masek. Oferuje wysoką dokładność przy jednoczesnym zachowaniu dużej szybkości działania, co czyni go popularnym rozwiązaniem w praktycznych systemach wizyjnych.
- U-Net to klasyczna architektura typu encoder-decoder zaprojektowana pierwotnie do segmentacji obrazów medycznych. Charakteryzuje się symetryczną strukturą oraz połączeniami typu skip connection, które umożliwiają zachowanie informacji przestrzennej na różnych poziomach sieci. Dzięki swojej prostocie i skuteczności jest szeroko stosowana w segmentacji defektów materiałowych.

- HRNet (High-Resolution Network) to architektura, która utrzymuje wysoką rozdzielczość reprezentacji cech na wszystkich etapach przetwarzania obrazu. W przeciwieństwie do klasycznych modeli encoder-decoder, HRNet równolegle przetwarza informacje na wielu skalach i stale je integruje, co pozwala na bardzo precyzyjne odwzorowanie detali i krawędzi obiektów.

Do oceny jakości modeli segmentacyjnych stosuje się zestaw metryk opartych na porównaniu predykcji modelu z danymi referencyjnymi (tab. 1). Podstawą ich obliczeń są wartości:

- TP (True Positives) – liczba pikseli (lub obiektów), które zostały poprawnie sklasyfikowane jako uszkodzenie – model wykrył defekt tam, gdzie on rzeczywiście występuje;
- FP (False Positives) – liczba pikseli błędnie sklasyfikowanych jako uszkodzenie – model wskazuje defekt tam, gdzie go faktycznie nie ma (fałszywe alarmy);
- FN (False Negatives) – liczba pikseli, które są rzeczywistymi uszkodzeniami, ale nie zostały wykryte przez model – model „przeoczył” defekt;
- TN (True Negatives) – liczba pikseli poprawnie sklasyfikowanych jako brak uszkodzenia – model prawidłowo rozpoznaje obszary bez defektów.

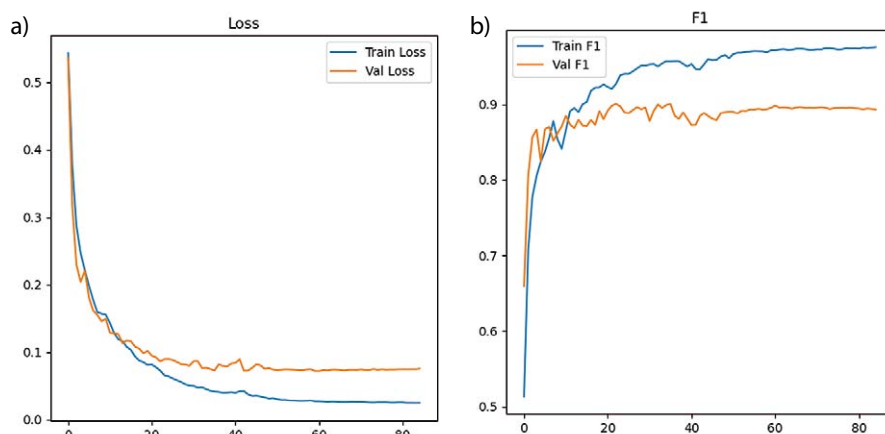
W zadaniach segmentacji uszkodzeń betonu (zwłaszcza odprysków) metryki takie jak IoU i Dice są bardziej reprezentatywne niż Accuracy, ponieważ uwzględniają nierównowagę klas i lepiej odzwierciedlają jakość odwzorowania granic defektów. W badaniu wykorzystano zbiór 138 obrazów przedstawiających uszkodzenia betonu w postaci odprysków. Zbiór danych został podzielony na część treningową oraz testową, co umożliwiło ocenę zdolności generalizacji analizowanych modeli. Dane obejmują zróżnicowane przypadki uszkodzeń, charakteryzujące się nieregularną geometrią oraz zmiennymi warunkami wizualnymi.

Tabela 1. Metryki wykorzystane do oceny jakości modeli segmentacyjnych

Metryka	Wzór	Interpretacja
Intersection over Union (IoU)	$IoU = \frac{TP}{TP + FP + FN}$	Miara określająca stopień pokrycia się obszaru przewidzianego przez model z obszarem referencyjnym. Wartości IoU mieszczą się w zakresie [0, 1], gdzie 1 oznacza idealne dopasowanie.
Dice coefficient (F1-score dla segmentacji)	$Dice = \frac{2TP}{2TP + FP + FN}$	Miara podobieństwa dwóch zbiorów, bardziej wrażliwa na małe obiekty niż IoU. Często stosowana w zadaniach medycznych i segmentacji defektów.
Accuracy (dokładność ogólna)	$Acc = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$	Udział poprawnie sklasyfikowanych pikseli w całym obrazie. Metryka ta może być myląca przy niezbalansowanych danych (np. mały obszar uszkodzeń).
Precision (precyzja)	$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$	Określa, jaki odsetek wykrytych pikseli faktycznie są defektami. Wysoka wartość oznacza małą liczbę fałszywych alarmów.
Recall (czułość, TPR)	$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$	Określa, jaki odsetek rzeczywistych defektów zostały poprawnie wykryte.
F1-score	$F1 = 2 * \frac{Precision * Recall}{Precision + Recall}$	Średnia harmoniczna precyzji i czułości, równoważąca oba wskaźniki.

Tabela 2. Analiza skuteczności poszczególnych modeli segmentacyjnych

Model	IoU	Dice coefficient	Accuracy	Precision	Recall	F1
DeepLabV3+	0,709	0,825	0,973	0,870	0,790	0,825
YOLO26-seg	0,604	0,691	0,955	0,824	0,755	0,691
YOLO11-seg	0,599	0,708	0,945	0,725	0,830	0,708
YOLOv8-seg	0,560	0,677	0,954	0,801	0,731	0,677
UNet	0,490	0,654	0,934	0,570	0,779	0,654
HRNet	0,470	0,639	0,949	0,765	0,549	0,639

Rys. 1. Przebieg funkcji straty (a) i metryki F1 (b) zbioru treningowego i walidacyjnego modelu DeepLabV3+

3. Wyniki badań

Przeprowadzona analiza porównawcza wykazała istotne różnice w skuteczności poszczególnych modeli segmentacyjnych (tab. 2).

Najlepsze wyniki uzyskał model DeepLabV3+, osiągając najwyższą wartość współczynnika IoU (0,709), Dice (0,825) oraz F1 (0,825), przy jednocześnie wysokiej precyzji (0,870) i dokładności ogólnej (0,973). Wskazuje to na bardzo dobrą równowagę pomiędzy wykrywaniem uszkodzeń a ograniczeniem liczby fałszywych detekcji.

Modele z rodziny YOLO wykazały zróżnicowaną skuteczność. YOLO11-seg osiągnął relatywnie wysoką wartość recall (0,830), co oznacza dobrą zdolność wykrywania rzeczywistych uszkodzeń, jednak kosztem niższej precyzji (0,725). Z kolei YOLO26-seg oraz YOLOv8-seg charakteryzują się wyższą precyzją (0,824 oraz 0,801), co wskazuje na mniejszą liczbę fałszywych alarmów, jednak przy jednocześnie niższej kompletności detekcji (recall odpowiednio 0,755 i 0,731). Wartości Dice dla modeli YOLO mieszczą się w zakresie 0,677–0,708, co potwierdza ich umiarkowaną skuteczność w zadaniach precyzyjnej segmentacji.

Model U-Net, pomimo stosunkowo wysokiej wartości recall (0,779), uzyskał najniższą precyzję (0,570), co wskazuje na dużą liczbę błędnych detekcji. W rezultacie jego wynik Dice (0,654) pozostaje wyraźnie niższy niż w przypadku modeli bardziej zaawansowanych architektonicznie.

Model HRNet osiągnął umiarkowaną precyzję (0,765), jednak bardzo niską wartość recall (0,549), co oznacza istotne problemy z wykrywaniem wszystkich obszarów uszkodzeń. Pomimo relatywnie wysokiej dokładności (0,949), jego wynik Dice (0,639) jest najniższy spośród analizowanych modeli, co wskazuje na ograniczoną przydatność w zadaniach wymagających pełnej identyfikacji defektów.

Podsumowując, model DeepLabV3+ wykazał najwyższą skuteczność w analizowanym zadaniu, zapewniając najlepszą równowagę pomiędzy precyzją a czułością. Modele YOLO mogą stanowić kompromis pomiędzy dokładnością a wydajnością

obliczeniową, natomiast U-Net i HRNet wykazują ograniczenia w kontekście segmentacji złożonych uszkodzeń, takich jak odpryski.

Szczegółową analizę przebiegu procesu uczenia przedstawiono dla modelu DeepLabV3+, który uzyskał najlepsze wyniki spośród wszystkich analizowanych architektur. Wybór tego modelu do dalszej analizy wynika z jego najwyższej skuteczności w zakresie kluczowych metryk (IoU, Dice, F1), co pozwala na ocenę charakterystyki procesu uczenia dla rozwiązania o największym potencjale aplikacyjnym.

Przebieg funkcji straty (loss) dla zbioru treningowego i walidacyjnego modelu DeepLabV3+ przedstawiono na rysunku 1a. W początkowej fazie uczenia obserwuje się gwałtowny spadek wartości loss (z poziomu ok. 0,55 do poniżej 0,15 w ciągu pierwszych ~10 epok), co wskazuje na szybkie dopasowanie modelu do danych. Następnie tempo spadku maleje, a krzywa treningowa stopniowo stabilizuje się na poziomie ok. 0,03. W przypadku zbioru walidacyjnego loss również maleje, jednak stabilizuje się na wyższym poziomie (ok. 0,07–0,08). Różnica pomiędzy krzywymi treningową i walidacyjną sugeruje występowanie umiarkowanego overfittingu, jednak jego skala jest ograniczona i nie prowadzi do pogorszenia jakości generalizacji modelu.

Przebieg metryki F1 przedstawiono na rysunku 1b. W pierwszych epokach widoczny jest dynamiczny wzrost wartości F1, co wskazuje na szybkie uczenie się modelu w zakresie detekcji i segmentacji uszkodzeń. Po około 20–30 epokach krzywe zaczynają się stabilizować.

Wartość F1 dla zbioru treningowego osiąga poziom powyżej 0,95, natomiast dla zbioru walidacyjnego stabilizuje się w zakresie ok. 0,88–0,90. Niewielka różnica między tymi wartościami

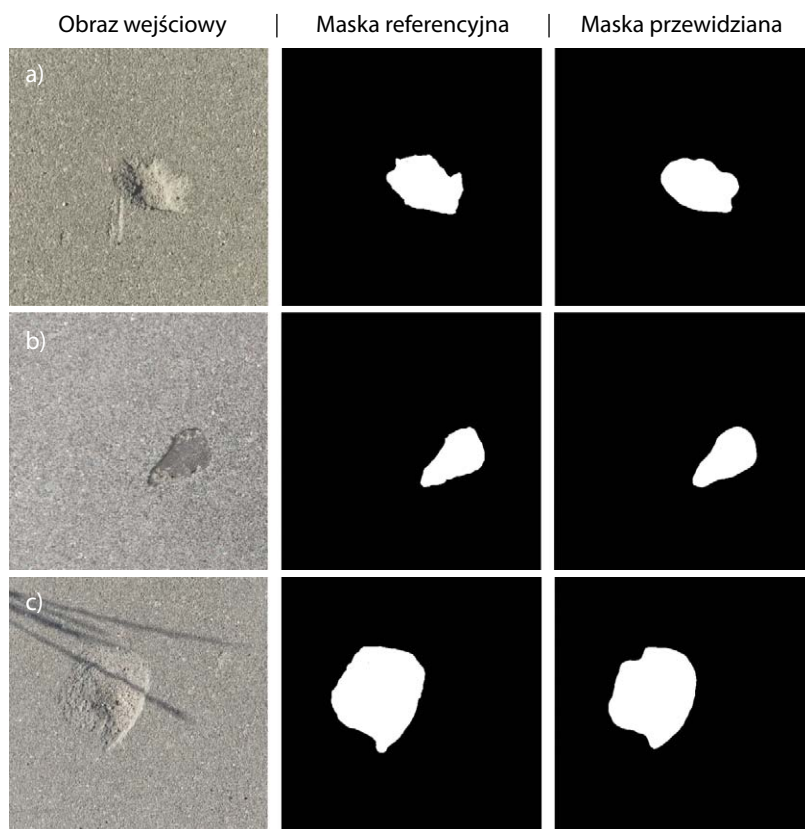
potwierdza dobrą zdolność generalizacji modelu, mimo lekkiego przeuczenia.

Istotne jest również, że brak jest wyraźnych oscylacji krzywej walidacyjnej w końcowej fazie treningu, co wskazuje na stabilność procesu uczenia oraz odpowiednio dobrane hiperparametry. Przykłady wyników segmentacji odprysków uzyskanych przy użyciu modelu DeepLabV3+ przedstawiono na rysunku 2.

W przypadku 2a model bardzo dobrze odwzorowuje zarówno kształt, jak i lokalizację odprysku. Granice segmentacji są zbliżone do maski referencyjnej, przy niewielkich różnicach na krawędziach. Świadczy to o wysokiej zdolności modelu do identyfikacji wyraźnych, kontrastowych uszkodzeń. W przykładzie 2b obserwuje się nieco większe odchylenia w odwzorowaniu geometrii defektu, szczególnie w jego wydłużonej części. Model poprawnie lokalizuje uszkodzenie, jednak maska przewidziana jest nieco uproszczona względem rzeczywistego kształtu. Może to wynikać z mniejszego kontrastu oraz bardziej nieregularnej struktury odprysku. W przypadku 2c model ponownie osiąga wysoką zgodność z maską referencyjną, pomimo obecności dodatkowych zakłóceń wizualnych (np. cienie lub linie na powierzchni). Oznacza to dobrą odporność modelu na szum oraz elementy nieistotne z punktu widzenia segmentacji. We wszystkich analizowanych przypadkach model prawidłowo identyfikuje obszary uszkodzeń, bez generowania istotnych fałszywych detekcji poza ich granicami. Różnice pomiędzy maskami referencyjnymi a przewidywanymi dotyczą głównie precyzji odwzorowania krawędzi, co jest typowym wyzwaniem w zadaniach segmentacji defektów o nieregularnych granicach.

4. Podsumowanie

Podsumowując, rozwój metod wizji komputerowej w połączeniu z technikami uczenia maszynowego stanowi jeden z najbardziej obiecujących kierunków badań w obszarze diagnostyki konstrukcji. Model DeepLabV3+ wykazuje wysoką skuteczność w segmentacji odprysków betonu, zapewniając dobrą zgodność z danymi referencyjnymi oraz stabilną generalizację. Jednocześnie głównym ograniczeniem pozostaje precyzyjne odwzorowanie granic defektów, co wskazuje na potrzebę dalszej optymalizacji metod segmentacji. Wyniki ilościowe i jakościowe są ze sobą spójne i potwierdzają przewagę modelu nad pozostałymi analizowanymi architekturami. Szczególnie istotna jest jego zdolność do poprawnej detekcji uszkodzeń w warunkach zakłóceń wizualnych, takich jak zmienne oświetlenie czy obecność artefaktów. W kontekście zastosowań praktycznych model może stanowić podstawę do budowy zautomatyzowanych systemów inspekcji konstrukcji betonowych.



Rys. 2. Przykłady wyników segmentacji odprysków

BIBLIOGRAFIA

- [1] Hajalizadeh D., Deep Learning-Based Indirect Bridge Damage Identification System, *Struct. Health Monit.* 22, 2023, str. 897–912
- [2] Dziecioł J., Sas W., Perspective on the Application of Machine Learning Algorithms for Flow Parameter Estimation in Recycled Concrete Aggregate, *Materials* 16, 2023, art. 1500, doi:10.3390/ma16041500
- [3] Raiaan M. A. K., Sakib S., Fahad N. M., Mamun A. A., Rahman Md. A., Shatabda S., Mukta Md. S. H., A Systematic Review of Hyperparameter Optimization Techniques in Convolutional Neural Networks, *Decis. Anal. J.* 11/2024, art. 100470, doi:10.1016/j.dajour.2024.100470
- [4] Li X., Meng Q., Wei M., Sun H., Zhang T., Su R., Identification of Underwater Structural Bridge Damage and BIM-Based Bridge Damage Management, *Appl. Sci.* 13, 2023, art. 1348, doi:10.3390/app13031348
- [5] Guo Q., He Z., Wang Z., Monthly Climate Prediction Using Deep Convolutional Neural Network and Long Short-Term Memory, *Sci. Rep.* 14, 2024, art. 17748
- [6] Mugnai F., Bonora V., Tucci G., Integration, Harmonization, and Processing of Geomatic Data for Bridge Health Assessment: The Lastra a Signa Case Study, *Appl. Geomat.* 15, 2023, str. 533–550, doi:10.1007/s12518-023-00510-1
- [7] Trach R., Tyvoniuk V., Trach Y., Improving Segmentation Accuracy for Asphalt Pavement Cracks via Integrated Probability Maps, *Appl. Sci.* 15, 2025, art. 9865, doi:10.3390/app15189865
- [8] Ichi E., Dorafshan S., Evaluation of Infrared Thermography Dataset for Delamination Detection in Reinforced Concrete Bridge Decks, *Appl. Sci.* 14, 2024, art. 2455, doi:10.3390/app14062455
- [9] Yessoufou F., Zhu J., One-Class Convolutional Neural Network (OC-CNN) Model for Rapid Bridge Damage Detection Using Bridge Response Data, *KSCE J. Civ. Eng.* 27, 2023, str. 1640–1660
- [10] Shen Y., Yu Z., Li C., Zhao C., Sun Z., Automated Detection for Concrete Surface Cracks Based on Deeplabv3+ BDF, *Buildings* 13, 2023, art. 118, doi:10.3390/buildings13010118
- [11] Tyvoniuk V., Trach R., Trach Y., Integration of Probability Maps into Machine Learning Models for Enhanced Crack Segmentation in Concrete Bridges, *Appl. Sci.* 15, 2025, art. 3201, doi:10.3390/app15063201

Logika parametryzacji w budownictwie i architekturze swobodnych form strukturalnych

The logic of parametrisation in structural engineering and the architecture of freeform structural systems

dr inż. arch. Anna Stefańska (ORCID: 0000-0002-5070-3877), Instytut Inżynierii Lądowej, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7925

Streszczenie: Projektowanie swobodnych form strukturalnych wymaga jednoczesnej kontroli geometrii, pracy konstrukcji, doboru materiału i sposobu realizacji. W takich układach parametryzacja nie jest wyłącznie metodą modelowania kształtu, lecz narzędziem organizowania zależności między formą, logiką nośną, informacją o obiekcie i wykonalnością. Celem artykułu jest przedstawienie logiki parametryzacji w budownictwie i architekturze swobodnych form strukturalnych jako metody integrującej modelowanie geometryczne, analizę konstrukcyjną, optymalizację i środowisko BIM. Artykuł ma charakter narracyjnego przeglądu problemu. Zakres literatury dobrano według jawnych kryteriów tematycznych, czasowych i jakościowych, obejmując głównie aktualne publikacje dotyczące projektowania parametrycznego, generatywnego, optymalizacji konstrukcyjnej, struktur free-form oraz integracji BIM. Wykazano, że wartość parametryzacji polega nie na generowaniu złożoności formalnej, lecz na integrowaniu decyzji architektonicznych, konstrukcyjnych i realizacyjnych w jednym modelu projektowym.

Słowa kluczowe: parametryzacja, formy swobodne, inżynieria konstrukcyjna, gridshell, powłoki, optymalizacja wielokryterialna, BIM, projektowanie generatywne.

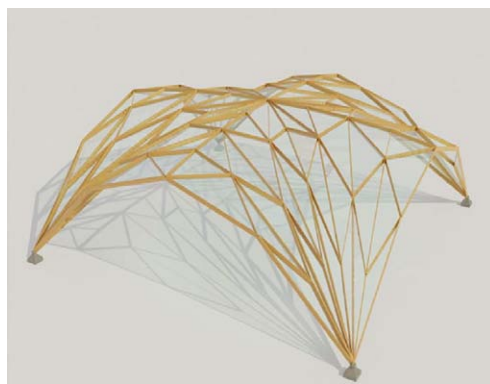
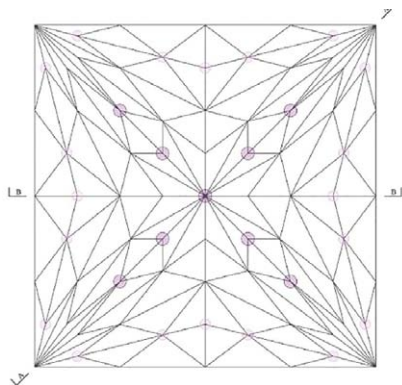
Abstract: The design of freeform structures requires simultaneous control of geometry, structural performance, material selection, and implementation methods. In such systems, parametrisation is not only a method of shape modelling, but also a tool for organising the relationships between form, load-bearing logic, object information and feasibility. The aim of this article is to present the logic of parameterisation in structural engineering and the architecture of freeform structures as a method integrating geometric modelling, structural analysis, optimisation, and the BIM environment. The article is a narrative problem-oriented literature review. The sources were selected according to explicit thematic, temporal and quality criteria, with emphasis on recent publications on parametric and generative design, structural optimisation, freeform systems and BIM integration. It is shown that the value of parameterisation lies not in generating formal complexity, but in integrating architectural, structural and implementation decisions within a single design model.

Keywords: parametrisation, free forms, structural engineering, gridshell, freeform shells, multi-criteria optimisation, BIM, generative design.

1. Wprowadzenie

Dyskusja o parametryzacji w architekturze przez wiele lat była silnie związana z problemem ekspresji formalnej. Taki punkt widzenia okazał się jednak niewystarczający wszędzie tam, gdzie forma przestała być autonomicznym efektem kompozycyjnym, a zaczęła stanowić wynik sprzężenia interdyscyplinarnych zmiennych [1]. Współczesne projektowanie obiektów o geometrii swobodnej nie może być prowadzone w klasycznym układzie sekwencyjnym, w którym forma architektoniczna jest przyjmowana jako założenie wyjściowe, a dopiero później dostosowywana do wymagań konstrukcyjnych i wykonawczych. Takie podejście często prowadzi do nadmiernego zużycia materiału, komplikacji realizacyjnych oraz utraty spójności między założeniem przestrzennym a logiką nośną układu.

W strukturach swobodnych geometria nie pełni wyłącznie funkcji formalnej, lecz bezpośrednio wpływa na zachowanie ustroju. Krzywizna powierzchni, sposób podziału siatki, rozmieszczenie podpór, lokalna sztywność i wzajemna relacja między elementami nośnymi współdecydują o rozkładzie sił wewnętrznych, przemieszczeniach, stateczności i wykonalności całego systemu. Nawet niewielka zmiana kształtu może więc prowadzić do istotnej zmiany pracy konstrukcji [2]. W tym ujęciu parametr nie jest jedynie zmienną geometryczną, lecz nośnikiem informacji o zależnościach między częściami systemu. To przesunięcie od reprezentacji kształtu do reprezentacji relacji stanowi jedną z najważniejszych zmian we współczesnym projektowaniu cyfrowym. Parametryzacja staje się dzięki temu nie tylko techniką modelowania, ale przede wszystkim narzędziem organizowania procesu projektowego. Jej znaczenie polega na możliwości zapisu i kontroli zależności między geometrią, układem



Rys. 1. Przykład zastosowania parametryzacji w kontekście kształtowania swobodnych form przestrzennych zadaserz otwartych (opracowanie własne)

konstrukcyjnym i warunkami realizacyjnymi obiektu (rys. 1). Parametrami mogą być między innymi krzywizna powierzchni, wysokość konstrukcyjna, gęstość siatki, położenie podpór, długości elementów, wielkości przekrojów, zasady panelizacji czy stopień unifikacji komponentów. Dzięki temu model parametryczny może służyć nie tylko do generowania wariantów geometrycznych, lecz także do oceny ich konsekwencji konstrukcyjnych i technologicznych. W takich przypadkach model parametryczny może być bezpośrednio powiązany z analizą numeryczną, procedurami formfindingu, optymalizacją wielokryterialną oraz środowiskiem BIM.

Celem artykułu jest przedstawienie logiki parametryzacji w projektowaniu konstrukcji i architektury swobodnych form strukturalnych jako metody integrowania geometrii, pracy ustroju i wykonalności. W tekście omówiono znaczenie parametrów konstrukcyjnych w modelowaniu swobodnych form, aktualne kierunki badań nad optymalizacją takich układów oraz rolę inspiracji biomimetycznych w rozwijaniu współczesnych metod formfindingu. Artykuł ma charakter przeglądowy, ale jego głównym celem jest wskazanie, że parametr nie jest wyłącznie zmienną geometryczną, lecz podstawowym nośnikiem decyzji projektowej.

2. Procedura przeglądu i kryteria doboru źródeł

Artykuł opracowano jako narracyjny przegląd problemowy literatury, ukierunkowany na wyjaśnienie roli parametryzacji w projektowaniu swobodnych form strukturalnych. Przegląd nie ma charakteru metaanalizy ilościowej. Jego celem jest uporządkowanie pojęć, wskazanie aktualnych kierunków badań oraz zestawienie zależności między modelowaniem geometrycznym, analizą konstrukcyjną, optymalizacją, BIM i wykonalnością. Dobór źródeł prowadzono według czterech kryteriów. Po pierwsze, uwzględniono publikacje bezpośrednio dotyczące projektowania parametrycznego, generatywnego i algorytmicznego w architekturze oraz budownictwie. Po drugie, wybrano prace odnoszące te metody do analizy konstrukcyjnej, formfindingu, optymalizacji wielokryterialnej, struktur free-form, gridshelli, powłok i systemów o złożonej krzywiznie. Po trzecie, włączono opracowania dotyczące BIM, DfMA, LCA i organizacji danych

projektowych, jeżeli pokazywały one związek między modelem parametrycznym a etapem realizacyjnym. Po czwarte, uwzględniono wybrane publikacje biomimetyczne, gdy prezentowały one parametryzację jako metodę opisu relacji między geometrią, hierarchią struktury i przebiegiem sił.

Pierwszeństwo nadano recenzowanemu artykule naukowemu z lat 2020–2025, uzupełnionym o wcześniejsze prace autorki i współautorów, istotne dla wątku biomimetyki i formfin-

dingu. Źródła wykluczano, jeżeli ograniczały się do prezentacji narzędzi bez omówienia ich znaczenia metodologicznego, dotyczyły wyłącznie wizualnego modelowania formy albo nie odnosiły się do relacji między geometrią, konstrukcją, informacją i realizacją. Taki dobór literatury pozwolił utrzymać przegląd w zakresie problemowym artykułu, a jednocześnie uniknąć sprowadzenia parametryzacji do opisu pojedynczego oprogramowania lub stylu formalnego.

3. Parametryzacja jako logika relacyjna

W literaturze coraz wyraźniej odróżnia się projektowanie parametryczne, generatywne i algorytmiczne. To rozróżnienie nie jest czysto terminologiczne. Pozwala ono zrozumieć, że parametryzacja sama w sobie nie gwarantuje ani powstawania nowych wariantów, ani ich racjonalności konstrukcyjnej. Model parametryczny może pozostać jedynie układem zależności geometrycznych, jeżeli nie zostanie sprzęgnięty z analizą, oceną lub procedurą optymalizacji. W inżynierii konstrukcyjnej istotne staje się więc nie tyle posiadanie modelu parametrycznego, ile zdefiniowanie takich parametrów, które mają realną sprawczość wobec pracy układu.

Relacyjny charakter modelu parametrycznego polega na tym, że obiekt scharakteryzowany jest jako układ współzależnych reguł. Zmiana jednego parametru, na przykład krzywizny powierzchni, położenia podpór lub gęstości siatki, wpływa równocześnie na geometrię, długości elementów, warunki podparcia, rozkład sił wewnętrznych oraz sposób podziału i prefabrykacji. W tym sensie model parametryczny nie służy wyłącznie do generowania wariantów, lecz do śledzenia skutków zmian projektowych i porównywania ich konsekwencji na różnych poziomach układu. Z punktu widzenia konstrukcji budynku można wyróżnić trzy podstawowe warstwy tej relacyjności. Pierwsza ma charakter projektowy i obejmuje zmienne morfologiczne, takie jak rozpiętość, wysokość, krzywizna, topologia powierzchni czy hierarchia elementów nośnych. Druga ma charakter analityczny i dotyczy wpływu tych zmiennych na sztywność, stateczność, przemieszczenia oraz efektywność materiałową. Trzecia warstwa odnosi się do realizacji i obejmuje unifikację komponentów, panelizację, ograniczenia produkcyjne, montaż i koordynację

międzybranżową. Dopiero łączne ujęcie tych trzech poziomów uzasadnia traktowanie parametryzacji jako logiki relacyjnej, a nie jedynie jako narzędzia modelowania.

Takie podejście jest coraz wyraźniej widoczne w aktualnych badaniach. W pracach dotyczących zintegrowanego środowiska CAD i analizy konstrukcyjnej podkreśla się, że model parametryczny powinien umożliwiać równoczesne rozwijanie geometrii i ocenę jej skutków mechanicznych, bez rozdzielania fazy koncepcyjnej i obliczeniowej [3]. W tym ujęciu relacyjność oznacza bezpośrednie powiązanie modelu geometrycznego z modelem analitycznym, co jest szczególnie istotne w projektowaniu lekkich powłok i struktur o złożonej krzywiznie.

Parametryzacja zyskuje pełną wartość, gdy zapisuje nie tylko zależności geometryczne i obliczeniowe, ale także strukturę danych potrzebnych do dalszego uszczegółowienia, koordynacji i organizacji procesu budowlanego. W tym sensie model parametryczny staje się narzędziem zarządzania informacją techniczną, a nie tylko generowania formy [4]. Badania nad parametrycznym tworzeniem bibliotek obiektów BIM dobrze pokazują, że relacyjność modelu obejmuje także sposób klasyfikowania i przekazywania danych potrzebnych na etapie wykonawczym.

Najbardziej praktyczny wymiar tej logiki ujawnia się jednak na styku projektowania i realizacji. W strukturach swobodnych poprawność statyczna nie przesądza jeszcze o jakości rozwiązania, ponieważ równie istotna pozostaje jego wykonalność. Parametry powinny więc obejmować także liczbę typów elementów, promienie gięcia, stopień powtarzalności, zasady prefabrykacji, montażu i kontroli jakości. W literaturze poświęconej integracji BIM z DfMA podkreśla się, że wartość modelu parametrycznego rośnie wtedy, gdy skutki decyzji geometrycznej mogą być bezpośrednio przeniesione na poziom produkcji i montażu [5]. Istotnym rozwinięciem relacyjnego ujęcia parametryzacji są badania biomimetyczne, w których zależności występujące w systemach naturalnych są traktowane jako model organizacji strukturalnej, a nie jedynie jako źródło analogii formalnych. W takim podejściu parametry opisują nie tylko geometrię obiektu, ale również hierarchię elementów, sposób rozgałęziania, lokalną adaptację układu oraz relację między dystrybucją materiału a przebiegiem sił. Biomimika wzmacnia tym samym techniczne rozumienie parametryzacji jako narzędzia integrującego morfogenezę i logikę konstrukcyjną. Potwierdzają to analizy zastosowań biomimetyki w projektowaniu architektonicznym i strukturalnym, wskazujące na przejście od inspiracji przyrodniczej do operacyjnego modelowania zasad organizacyjnych systemu [6], a także badania nad strukturami arboralnymi, w których geometria podpór, topologia rozgałęzień i zachowanie mechaniczne układu są rozwijane współzależnie w procesie formfindingu [7]. W tym sensie biomimetyka nie stanowi odrębnego nurtu wobec parametryzacji, lecz jej wyspecjalizowany kierunek, szczególnie użyteczny w projektowaniu struktur swobodnych o złożonej hierarchii geometrycznej i nośnej.

W rezultacie parametryzację można rozumieć jako metodę integrowania trzech porządków: formy, wydajności i realizacji. W pierwszym parametry sterują geometrią i morfologią ustroju,

w drugim wpływają na pracę konstrukcji i zużycie materiału, a w trzecim określają możliwość racjonalnego wytworzenia i złożenia systemu. Taka definicja ma szczególne znaczenie w architekturze swobodnych form strukturalnych, gdzie rozdzielanie tych porządków prowadzi najczęściej do konfliktu między ambicją formalną a racjonalnością techniczną.

4. Swobodna forma strukturalna jako pole weryfikacji logiki parametryzacji

Współczesne badania nad strukturami siatkowymi potwierdzają, że skuteczny model parametryczny musi łączyć opis powierzchni z logiką jej podziału i zachowaniem mechanicznym. W pracach poświęconych automatycznemu projektowaniu swobodnych jednowarstwowych siatek przestrzennych pokazano, że geometria swobodna wymaga jednoczesnego sterowania regularnością siatki, płynnością linii podziału i dopasowaniem układu do złożonych granic powierzchni [8]. Oznacza to, że parametryzacja nie dotyczy tu wyłącznie kształtu powierzchni bazowej, ale także sposobu, w jaki forma zostaje przekształcona w realny system nośny. W przypadku struktur powłokowych zależność ta staje się jeszcze bardziej wyraźna. Powłoki swobodne wymagają bowiem równoczesnej kontroli geometrii, grubości i lokalnej topologii, ponieważ dopiero łączne ujęcie tych zmiennych pozwala osiągnąć wysoką efektywność materiałową przy zachowaniu warunków nośności i realizacji. Badania nad optymalizacją sprzężoną z kształtem, grubością i topologią pokazują, że forma swobodna nie może być traktowana jako dane wejściowe dla optymalizacji, lecz sama staje się zależna od warunków brzegowych [9]. Z perspektywy metodologicznej oznacza to przejście od modelu sprawdzającego formę do modelu współtworzącego jej logikę konstrukcyjną. W najnowszych pracach nad grid-shellami podkreśla się, że samo uzyskanie korzystnego rozwiązania mechanicznego nie wystarcza, jeżeli zoptymalizowana powierzchnia nie daje się przełożyć na system paneli o akceptowalnym stopniu podobieństwa, powtarzalności i trudności wykonania [10]. Oznacza to, że w przypadku form swobodnych parametryzacja musi obejmować nie tylko kryteria statyczne, ale także miary związane z gładkością powierzchni, regularnością podziału i złożonością produkcji.

Swobodna forma strukturalna nie może być traktowana jako niezależne założenie geometryczne, które dopiero w dalszej kolejności zostaje dostosowane do wymagań konstrukcyjnych i technologicznych. Im większa swoboda kształtowania geometrii, tym większe znaczenie mają precyzyjnie zdefiniowane parametry sterujące przebiegiem sił, podziałem struktury, hierarchią elementów nośnych i sposobem wykonania. W tym sensie struktury swobodne stają się obszarem, w którym logika konstrukcyjna, formfinding i algorytmizacja muszą działać równolegle. To właśnie taka współbieżność pozwala racjonalizować rozwiązania pod względem materiałowym, wykonawczym i energetycznym, a zarazem przywraca spójność między architekturą i budownictwem w projektach o wysokim stopniu złożoności geometrycznej.

5. Integracja optymalizacji i BIM w logice współpracy projektowej

Współczesne projektowanie algorytmiczne coraz rzadziej ogranicza się do generowania wariantów formalnych. Jego wartość ujawnia się wtedy, gdy model parametryczny zostaje powiązany z wymianą danych, analizą i decyzjami projektowymi. Integracja optymalizacji i BIM oznacza zatem nie tylko połączenie narzędzi, lecz przejście od modelowania geometrii do modelowania relacji międzybranżowych [11, 12]. Algorytmizacja pozwala zapisać zależności między formą, konstrukcją, zużyciem materiału, parametrami środowiskowymi i ograniczeniami wykonawczymi. BIM umożliwia utrzymanie tych zależności jako uporządkowanej informacji o obiekcie.

W tym ujęciu parametr staje się wspólnym nośnikiem informacji dla kilku dyscyplin jednocześnie [13]. Ta sama zmienna może opisywać krzywiznę powierzchni, wpływ tej krzywizny na sztywność układu, możliwość panelizacji oraz konsekwencje materiałowe lub energetyczne. Literatura dotycząca integracji generative design, parametric design i BIM wskazuje, że przewaga współczesnych narzędzi cyfrowych wynika właśnie ze zdolności łączenia różnych kryteriów w jednym środowisku danych [11]. Z perspektywy metodologicznej można wyróżnić pięć poziomów takiej integracji: morfologiczny,

morfologiczno-konstrukcyjny, informacyjny, wielokryterialny oraz wykonawczo-produkcyjny. Zestawiono je w tabeli 1. Tabela 1 pokazuje, że algorytmizacja wspiera interdyscyplinarność dopiero wtedy, gdy przekracza poziom samej geometrii. Najwięcej problemów pojawia się w projektach, które osiągną wysoką złożoność formalną, ale nie przechodzą na poziom integracji informacyjnej i wykonawczej. Wówczas model parametryczny tworzy warianty, lecz nie uzgadnia decyzji między architekturą, konstrukcją i realizacją. Projekty sprzęgające algorytmizację z BIM oraz optymalizacją zyskują natomiast możliwość śledzenia konsekwencji zmian na całej ścieżce projektowej [14].

Kierunek ten rozwija integracja BIM, algorytmów generatywnych i oceny cyklu życia budynków (LCA). Prace z 2025 roku pokazują, że parametryczne modele BIM mogą być łączone z generatywnymi algorytmami LCA już we wczesnej fazie projektu [15]. Pozwala to porównywać warianty obudowy pod względem wpływu środowiskowego przy zachowaniu informacji geometrycznej i materiałowej. Jest to szczególnie ważne dla obiektów o niestandardowej geometrii, ponieważ decyzje formalne wpływają bezpośrednio na ilość materiału, ciężar, transport i złożoność wykonania. BIM pełni tu rolę aktywnego środowiska oceny wariantów, a nie wyłącznie repozytorium danych [14].

Tabela 1. Poziomy integracji architektury i budownictwa poprzez projektowanie algorytmiczne

Poziom integracji	Co integruje algorytmizacja	Uczestnicy procesu	Środowisko danych/BIM	Typowe parametry	Główny efekt projektowy	Przykład obiektu/zastosowania
1. Integracja morfologiczna	geometrię, kompozycję przestrzenną i relacje formalne	architekt, konstruktor	model parametryczny, model 3D	krzywizna, wysokość, topologia, rytm podziału	kontrola geometrii i spójności formalnej	Heydar Aliyev Center, Baku
2. Integracja morfologiczno-konstrukcyjna	geometrię z analizą konstrukcyjną i formfindingiem	architekt, konstruktor, analityk	model parametryczny + model analityczny	położenie podpór, gęstość siatki, przekroje, długości elementów, deformacje	równoczesne kształtowanie formy i pracy ustroju	Beijing Daxing International Airport, free-form gridshell, lekkie powłoki
3. Integracja informacyjna	dane architektoniczne, konstrukcyjne i koordynacyjne	architekt, konstruktor, BIM manager, koordynatorzy branżowi	BIM jako środowisko wymiany informacji o obiekcie	klasy obiektów, atrybuty elementów, zależności komponentów, identyfikacja części	spójność danych i lepsza koordynacja międzybranżowa	złożone obiekty wielobranżowe, biblioteki parametryczne BIM
4. Integracja wielokryterialna	architekturę, konstrukcję, energię, środowisko i koszt	architekt, konstruktor, specjalista środowiskowy, kosztorysant	BIM + narzędzia optymalizacji i symulacji	masa, koszt, zużycie materiału, energia, emisje, parametry obudowy	porównanie wariantów i wybór rozwiązania uzasadnionego technicznie i środowiskowo	wysokościowce i fasady o niestandardowej obwodni, obiekty optymalizowane energetycznie
5. Integracja wykonawczo-produkcyjna	projektowanie, prefabrykację, montaż i kontrolę jakości	architekt, konstruktor, technolog, producent, wykonawca	BIM + dane produkcyjne i montażowe	panelizacja, promienie gięcia, numeracja części, tolerancje, sekwencja montażu	przejście od modelu projektowego do realizacji	King Abdulaziz Center for World Culture, złożone fasady i powłoki prefabrykowane

6. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza pokazuje, że logika parametryzacji w projektowaniu swobodnych form strukturalnych nie może być zredukowana do cyfrowego sterowania geometrią. Współczesne badania wskazują, że jej wartość ujawnia się wtedy, gdy model projektowy integruje formę, analizę konstrukcyjną, informację o obiekcie i warunki wykonawcze. Oznacza to przesunięcie od rozumienia parametru jako zmiennej opisowej do traktowania go jako nośnika decyzji projektowej. Taka decyzja ma jednocześnie konsekwencje przestrzenne, mechaniczne, materiałowe i technologiczne.

Z perspektywy architektury swobodnych form strukturalnych jest to zmiana zasadnicza. Formy free-form nie mogą być obecnie traktowane jako rezultat autonomicznego modelowania, który dopiero w dalszej kolejności podlega sprawdzeniu konstrukcyjnemu. W takich obiektach geometria współtworzy logikę nośną, wpływa na racjonalność podziału, warunki prefabrykacji i przebieg montażu. Tym samym jakość rozwiązania zależy nie od stopnia formalnej złożoności, lecz od stopnia integracji między poziomami morfologicznym, konstrukcyjnym, informacyjnym i wykonawczym.

Analiza literatury potwierdza także, że algorytmizacja wspiera interdyscyplinarność tylko wtedy, gdy jest powiązana z odpowiednio zorganizowanym środowiskiem danych. Sam model parametryczny nie rozwiązuje problemu współpracy międzybranżowej, jeżeli pozostaje odseparowany od analizy, dokumentacji i informacji wykonawczej. Dopiero połączenie go ze środowiskiem wymiany informacji o obiekcie pozwala utrzymać spójność między geometrią, modelem obliczeniowym, atrybutami elementów, kryteriami optymalizacji oraz danymi potrzebnymi do prefabrykacji. W tym ujęciu BIM jest naturalnym rozszerzeniem projektowania parametrycznego na poziom organizacji informacji o obiekcie i procesie budowlanym.

W świetle przeprowadzonych analiz można sformułować kilka zasadniczych wniosków:

- parametr w projektowaniu struktur swobodnych powinien być rozumiany jako zmienna integrująca, a nie jedynie opisująca;
- swobodna forma strukturalna nie jest przeciwieństwem racjonalności konstrukcyjnej, lecz obszarem, w którym jej poziom staje się najlepiej widoczny;
- projektowanie algorytmowe osiąga najwyższą wartość wtedy, gdy zostaje połączone z analizą konstrukcyjną, optymalizacją wielokryterialną i środowiskiem BIM;
- interdyscyplinarność nie wynika automatycznie z zastosowania narzędzi cyfrowych, ale z umiejętnego zapisania relacji między geometrią, strukturą, informacją i realizacją;
- inspiracje biomimetyczne wskazują obiecujący kierunek dalszych badań, ponieważ rozwijają parametryzację jako metodę projektowania systemowego, a nie jedynie formalnego. Istotnym wnioskiem jest również to, że integracja optymalizacji z modelowaniem parametrycznym zmienia sposób rozumienia racjonalności projektowej. W klasycznym podejściu racjonalizacja pojawiała się zwykle po etapie koncepcyjnym i polegała

na dostosowaniu przyjętej formy do wymagań konstrukcyjnych lub wykonawczych. W podejściu opartym na logice parametryzacji racjonalność staje się elementem generowania rozwiązania już od początku procesu. Dzięki temu możliwe jest jednoczesne porównywanie wariantów pod względem nośności, przemieszczeń, masy, zużycia materiału, złożoności wykonania czy wpływu środowiskowego. To właśnie ta zdolność do równoległej oceny wielu kryteriów sprawia, że projektowanie algorytmowe ma dziś szczególne znaczenie w obiektach o geometrii niestandardowej.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Caetano I., Santos L., Leitão A., Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design, *Frontiers of Architectural Research* 9, 2/2020, str. 287–300, doi: 10.1016/j.foar.2019.12.008
- [2] Chew Z. X., Wong J. Y., Tang Y. H., Yip C. C., Maul T., Generative Design in the Built Environment, *Automation in Construction* 166, 10/2024, art. 105638, doi: 10.1016/j.autcon.2024.105638
- [3] Goldbach A.-K., Lázaro C., CAD-integrated parametric design and analysis of lightweight shell structures, *Structures* 64, 6/2024, art. 106566, doi: 10.1016/j.jistruc.2024.106566
- [4] Getuli V., Bruttini A., Rahimian F., Parametric design methodology for developing BIM object libraries in construction site modeling, *Automation in Construction* 170, 2/2025, art. 105897, doi: 10.1016/j.autcon.2024.105897
- [5] Widanage C., Kim K. P., Integrating Design for Manufacture and Assembly (DfMA) with BIM for infrastructure, *Automation in Construction* 167, 11/2024, art. 105705, doi: 10.1016/j.autcon.2024.105705
- [6] Dixit S., Stefańska A., Bio-logic, a review on the biomimetic application in architectural and structural design, *Ain Shams Engineering Journal* 14, 1/2023, art. 101822, doi: 10.1016/J.ASEJ.2022.101822
- [7] Dixit S., Stefańska A., Musiuk A., Architectural form finding in arboreal supporting structure optimisation, *Ain Shams Engineering Journal* 12, no. 2/2021, str. 2321–2329, doi: 10.1016/j.asej.2020.08.022
- [8] Li Z., Ye J., Gao B., Wang Q., Quan G., Shepherd P., Digital and automatic design of free-form single-layer grid structures, *Automation in Construction* 133, 1/2022, art. 104025, doi: 10.1016/j.autcon.2021.104025
- [9] Meng X., Xiong Y., Xie Y. M., Sun Y., Zhao Z.-L., Shape-thickness-topology coupled optimization of free-form shells, *Automation in Construction* 142, 10/2022, art. 104476, doi: 10.1016/j.autcon.2022.104476
- [10] Zhong Y., Liu Y., Lu H., Feng R., Xie Y. M., Design and optimisation of grid shells for maximising both structural performance and panel similarity, *Engineering Structures* 329, 4/2025, art. 119820, doi: 10.1016/j.engstruct.2025.119820
- [11] Semjén Á. Á., Szép J., Integrating generative and parametric design with BIM: A literature review of challenges and research gaps in construction design, *Applications in Engineering Science* 23, 9/2025, art. 100253, doi: 10.1016/j.apples.2025.100253
- [12] Wong B. C. L., Wu Z., Gan V. J. L., Chan C. M., Cheng J. C. P., Parametric building information modelling and optimality criteria methods for automated multi-objective optimisation of structural and energy efficiency, *Journal of Building Engineering* 75, 9/2023, art. 107068, doi: 10.1016/j.job.2023.107068
- [13] Liao W., Lu X., Fei Y., Gu Y., Huang Y., Generative AI design for building structures, *Automation in Construction* 157, 1/2024, art. 105187, doi: 10.1016/j.autcon.2023.105187
- [14] Gómez de Cózar J. C., García-Martínez A., Morillo Merino B., Campón Tovar J. A., Rey-Álvarez B., An approach to using life cycle assessment generative algorithm in buildings: Optimisation of BIM models during the early design phase, *Journal of Cleaner Production* 530, 11/2025, art. 146847, doi: 10.1016/j.jclepro.2025.146847
- [15] Mowafy N., El Zayat M., Marzouk M., Parametric BIM-based life cycle assessment framework for optimal sustainable design, *Journal of Building Engineering* 75, 9/2023, art. 106898, doi: 10.1016/j.job.2023.106898

Narzędzia projektowania parametrycznego w adaptacyjnym projektowaniu konstrukcji: analiza porównawcza Grasshopper i Dynamo

Parameter design tools for adaptive design: comparative analysis of Grasshopper and Dynamo

mgr inż. arch. Małgorzata Kurcusz (ORCID: 0000-0002-9703-2118), Instytut Inżynierii Łądowej, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7821

Streszczenie: Parametryczne projektowanie konstrukcyjne łączy geometrię, zachowanie materiałów i kryteria nośności poprzez jawnie zdefiniowane relacje obliczeniowe, umożliwiając dynamiczne dostosowywanie systemu do zmian danych wejściowych. Programowanie wizualne wspiera ten proces, pozwalając projektantom budować logikę za pomocą połączonych bloków funkcji zamiast tradycyjnego kodu. Artykuł analizuje zastosowanie Grasshoppera i Dynamo jako środowisk programowania wizualnego wspierających współczesne parametryczne projektowanie konstrukcyjne. Omówiono sposób, w jaki oba narzędzia zarządzają logiką geometryczną, relacjami parametrycznymi oraz integracją kryteriów związanych z zachowaniem konstrukcji. Badanie obejmuje porównanie dla dwóch przypadków: modelowania dachu swobodnego oraz ramy wielokondygnacyjnej w obu narzędziach. Wyniki pokazują różnice w przepływie pracy, propagacji parametrów i przydatności w określonych zadaniach projektowych.

Słowa kluczowe: projektowanie parametryczne, adaptacyjne projektowanie konstrukcji, Grasshopper, Dynamo.

Abstract: Parametric structural design integrates geometry, material behavior, and load-bearing criteria through explicitly defined computational relationships, enabling the system to dynamically adapt to changes in input data. Visual programming supports this process, allowing designers to build logic using interconnected function blocks instead of traditional code. This paper examines the use of Grasshopper and Dynamo as visual programming environments supporting contemporary parametric structural design. This paper discusses how both tools manage geometric logic, parametric relationships, and the integration of structural behavior criteria. The study compares two case studies: the modeling of a free-form roof and a multi-story frame in both tools. The results demonstrate differences in workflow, parameter propagation, and suitability for specific design tasks.

Keywords: parametric design, adaptive structural design, Grasshopper, Dynamo.

1. Wprowadzenie

Projektowanie parametryczne pozwala definiować geometrię i parametry użytkowe na podstawie zależności logicznych, a nie sztywnych, niezmiennych form. W tym podejściu elementy projektu są sterowane przez parametry, czyli zmienne kontrolujące wymiary, proporcje lub zachowanie konstrukcji, co umożliwia ciągłe dostosowywanie modelu do zmian projektowych lub środowiskowych [1]. Rozwój środowisk programowania wizualnego, takich jak Grasshopper dla Rhinoceros 3D oraz Dynamo dla Autodesk Revit, sprawił, że projektowanie parametryczne stało się dostępne dla szerokiego grona specjalistów, także bez zaawansowanych umiejętności programistycznych. W przeciwieństwie do tradycyjnego programowania opartego na skryptach tekstowych programowanie wizualne organizuje operacje za pomocą połączonych ze sobą węzłów, które reprezentują dane, geometrię oraz funkcje przekształceń [2]. Taki sposób pracy ułatwia tworzenie dynamicznych systemów, w których forma, struktura

i parametry użytkowe są ze sobą powiązane. Dzięki łączeniu definicji geometrycznych z danymi analitycznymi i informacyjnymi projektowanie parametryczne wspierane przez programowanie wizualne stało się istotnym narzędziem integrującym kreatywność, efektywność i precyzję we współczesnym projektowaniu architektonicznym i konstrukcyjnym [3].

Grasshopper i Dynamo to dwa wiodące narzędzia projektowania parametrycznego we współczesnej praktyce architektonicznej, działające w odmiennych środowiskach programowych. Grasshopper funkcjonuje jako środowisko programowania wizualnego osadzone w Rhinoceros 3D, platformie modelowania opartej na NURBS, szeroko wykorzystywanej do swobodnej eksploracji złożonych form geometrycznych. Z kolei Dynamo działa jako rozszerzenie programowania wizualnego dla Autodesk Revit, integrując możliwości projektowania parametrycznego bezpośrednio w środowisku Modelowania Informacji o Budynku, czyli BIM [4]. Ta zasadnicza różnica architektoniczna stanowi podstawowe rozróżnienie między tymi

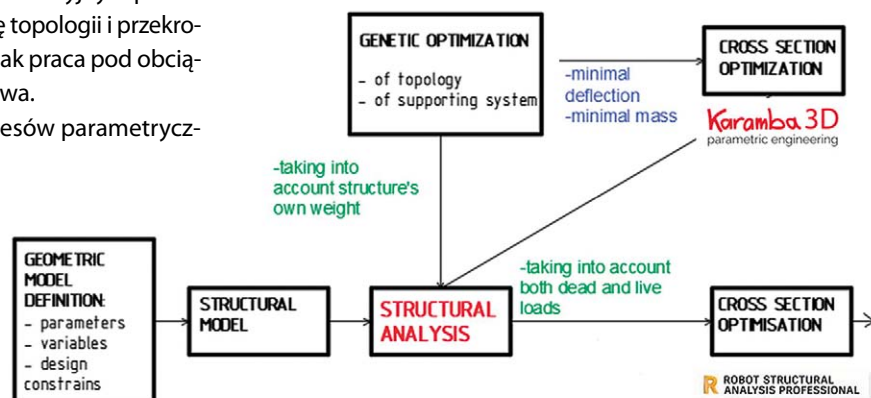
narzędziami. Grasshopper sprawdza się szczególnie na wczesnych etapach projektowania oraz przy pracy z bardziej złożoną geometrią, natomiast Dynamo usprawnia procesy w uporządkowanym środowisku BIM, kładąc nacisk na interoperacyjność danych oraz dokumentację budowlaną [5]. Obie platformy wykorzystują programowanie wizualne oparte na węzłach, co pozwala projektantom budować procesy obliczeniowe poprzez łączenie oddzielnych komponentów funkcjonalnych, bez konieczności pisania tradycyjnego kodu. Różnią się jednak podejściem do implementacji. Grasshopper oferuje rozbudowaną bibliotekę natywnych komponentów, uzupełnianą przez szeroki ekosystem wtyczek firm trzecich dostępnych m.in. przez Food4Rhino. Wśród nich znajdują się wyspecjalizowane narzędzia do analizy konstrukcyjnej, takie jak Karamba3D do analizy metodą elementów skończonych. Taka modułowa struktura pozwala tworzyć mocno spersonalizowane środowiska pracy dostosowane do konkretnych wyzwań konstrukcyjnych [6]. Dynamo przyjmuje bardziej zintegrowane podejście. Działa jako narzędzie automatyzujące procesy w środowisku BIM, umożliwiając dwukierunkową wymianę danych między Revit a zewnętrznym oprogramowaniem analitycznym, takim jak Robot Structural Analysis. Interfejs programowania wizualnego koncentruje się na parametrycznej modyfikacji elementów BIM oraz automatycznym generowaniu zestawień ilościowych, więc narzędzie jest przydatne w dokumentacji konstrukcyjnej i optymalizacji w ramach ustandaryzowanych procesów [7].

2. Przegląd literatury

Projektowanie konstrukcyjne w podejściu parametrycznym opiera się na definiowaniu jednoznacznych zależności między parametrami, geometrią a zachowaniem konstrukcji. Gdy dane wejściowe ulegają zmianie, cały model aktualizuje się automatycznie, co pozwala projektantom analizować wiele wariantów i podejmować decyzje w oparciu o mierzalne wskaźniki efektywności [8]. Takie podejście jest szczególnie korzystne przy pracy z formami złożonymi, systemami powtarzalnymi, zadaniami optymalizacyjnymi związanymi z kosztami lub zużyciem materiału, a także przy integracji modelowania konstrukcyjnego z analizami środowiskowymi [9]. Na rysunku 2 przedstawiono, w jaki sposób parametry geometryczne, analiza konstrukcyjna oraz metody optymalizacji współdziałają w iteracyjnym procesie projektowym. Pozwala to na modyfikację topologii i przekrojów elementów w oparciu o kryteria, takie jak praca pod obciążeniem, ugięcia czy efektywność materiałowa.

Istotnym elementem współczesnych procesów parametrycznych jest programowanie wizualne. Zamiast pisać tradycyjny kod, projektanci budują logikę i przepływy danych poprzez łączenie bloków funkcyjnych.

Rys. 1. Podstawowy schemat zintegrowanego procesu kształtowania [10]



Każdy blok odpowiada za określoną operację, a połączenia między nimi określają, w jaki sposób dane przemieszczają się w systemie. Takie podejście obniża próg wejścia do projektowania obliczeniowego i pozwala szybko testować różne strategie modelowania [11]. Wśród środowisk programowania wizualnego Grasshopper dla Rhinoceros 3D należy do najczęściej wykorzystywanych narzędzi w badaniach z zakresu projektowania architektonicznego i konstrukcyjnego [12]. Każdy obiekt geometryczny w programie Grasshopper definiowany jest za pomocą parametrów matematycznych: punkty przez współrzędne, krzywe przez punkty kontrolne i równania, a powierzchnie przez układy krzywych [1]. Zamiast bezpośrednio edytować geometrię, projektanci pracują na zależnościach, które sterują zachowaniem modelu. Przykładowo krawędź dachu może być zdefiniowana jako znajdująca się jeden metr powyżej górnej krawędzi ściany i będzie automatycznie aktualizować się przy każdej zmianie wysokości ściany.

Grasshopper opiera się głównie na strukturze danych w postaci drzew, co umożliwia zarządzanie dużą liczbą powiązanych elementów. Jest to szczególnie istotne w konfiguracjach modułowych, takich jak systemy fasadowe, siatki czy układy kratownicowe. Parametry można kontrolować za pomocą suwaków lub wyrażeń matematycznych, co pozwala aktualizować model w czasie rzeczywistym i szybko testować różne warianty projektowe. Narzędzia takie jak Galapagos umożliwiają automatyczne poszukiwanie formy i optymalizację na podstawie określonych kryteriów, na przykład minimalizacji zużycia materiału [13]. Ważną cechą jest także propagacja zmian: modyfikacja elementu bazowego, takiego jak krzywa prowadząca powoduje automatyczną aktualizację wszystkich zależnych komponentów. Grasshopper obsługuje zarówno geometrię NURBS, odpowiednią do precyzyjnego modelowania form płynnych, jak i siatki, które sprawdzają się w lepszych reprezentacjach, na przykład w symulacjach środowiskowych. Możliwości programu Grasshopper wykraczają poza samo generowanie form dzięki integracji z zewnętrznymi narzędziami analitycznymi. Umożliwia on bezpośrednią ocenę właściwości geometrycznych oraz łączenie ze środowiskami symulacyjnymi, takimi jak Karamba3D do analizy konstrukcyjnej [14]. Karamba3D to parametryczne środowisko analizy metodą elementów skończonych osadzone w Grasshopperze,

szczególnie przydatne na etapie koncepcji i wczesnego projektowania. Bardziej zaawansowane analizy konstrukcyjne mogą być prowadzone poprzez połączenia z programami Autodesk Robot Structural Analysis, Dlubal RFEM, Idea Statica, ETABS czy TSD. Integracje te przekształcają geometrię w elementy konstrukcyjne, takie jak belki, słupy czy ściany, co umożliwia interaktywne projektowanie oparte na analizie parametrów pracy konstrukcji [15]. Rozwój technologii Rhino.Inside.Revit dodatkowo poszerzył możliwości integracji projektowania parametrycznego z *Building Information Modelling*. Rozwiązanie to pozwala uruchamiać skrypty Grasshoppera bezpośrednio w środowisku Revit [16]. Choć wciąż istnieją pewne ograniczenia, metoda ta stanowi istotny krok w kierunku łączenia logiki parametrycznej z procesami BIM.

Dynamo, platforma programowania wizualnego w środowisku Autodesk Revit, działa w oparciu o logikę parametryczną modelu BIM. W przeciwieństwie do Grasshoppera, gdzie geometria ma charakter bardziej abstrakcyjny, w Dynamo operacje wykonywane są bezpośrednio na elementach modelu informacyjnego budynku, które zawierają dane o materiale, funkcji, kategorii oraz parametrach instancyjnych [12]. Oznacza to, że każda zmiana geometryczna jest jednocześnie zmianą informacyjną, wpływającą na dokumentację projektową, zestawienia oraz koordynację międzybranżową [17]. Każdy obiekt geometryczny utworzony w Dynamo może zostać przekształcony w rodzinę lub instancję Revita, co zapewnia jego pełne osadzenie w skoordynowanym środowisku BIM [18].

Dynamo wykorzystuje podejście oparte na łączeniu węzłów funkcyjnych, jednak jego struktura danych opiera się głównie na listach, co upraszcza operacje na zbiorach elementów, choć przy bardziej złożonych relacjach może wymagać dodatkowego przetwarzania danych [19]. Użytkownik definiuje zależności pomiędzy elementami modelu poprzez przepływ danych, co umożliwia automatyczne aktualizowanie geometrii i parametrów w odpowiedzi na zmiany wejściowe [20]. Dynamo oferuje szerokie możliwości automatyzacji procesów projektowych, takich jak generowanie i modyfikacja geometrii, zarządzanie parametrami, tworzenie dokumentacji czy kontrola spójności modelu. Może być również wykorzystywane do generowania złożonych układów geometrycznych, choć w praktyce częściej stosowane jest do operacji związanych z zarządzaniem informacją niż do eksploracji formy [21].

Istotnym aspektem jest również możliwość integracji z narzędziami analitycznymi. Dynamo może współpracować z Autodesk Robot Structural Analysis, umożliwiając przekazywanie modelu do analizy konstrukcyjnej oraz iteracyjne modyfikacje w oparciu o wyniki obliczeń. Istnieją także pakiety rozszerzające funkcjonalność programu, rozwijane przez społeczność, które pozwalają na integrację z innymi środowiskami obliczeniowymi, takimi jak SAP2000 czy RFEM [22]. W porównaniu z bardziej rozbudowanym i szeroko rozwijanym ekosystemem Grasshoppera rozwiązania te są jednak zazwyczaj bardziej wyspecjalizowane i w większym stopniu zależne od kompatybilności wersji oprogramowania oraz dostępności interfejsów API.

3. Metody badawcze

Przeanalizowano dwie typologie konstrukcyjne w celu porównania sposobu, w jaki Grasshopper i Dynamo wspierają modelowanie parametryczne oraz organizację procesu projektowego:

- dach swobodnej formy, reprezentujący układy o wysokiej złożoności geometrycznej, w których kluczowe znaczenie ma zarządzanie ciągłością powierzchni, podziałem geometrycznym oraz relacjami parametrycznymi,
 - wielokondygnacyjną ramę regularną, reprezentującą układy powtarzalne i hierarchiczne, typowe dla środowiska BIM.
- Analiza została przeprowadzona według zestawu jakościowych kryteriów porównawczych obejmujących:
- sposób reprezentacji i organizacji geometrii,
 - zarządzanie strukturami danych,
 - propagację zmian parametrów w modelu,
 - stabilność i przewidywalność działania skryptów,
 - łatwość iteracyjnego modyfikowania modelu,
 - stopień integracji z modelem BIM i strukturą danych projektu.

Obie konstrukcje zostały zamodelowane niezależnie w środowisku Grasshopper (Rhinceros 3D) oraz Dynamo (Autodesk Revit). Analizie poddano sposób budowy modeli, reakcję na zmiany parametrów oraz zachowanie systemu przy kolejnych iteracjach projektowych. Przyjęte podejście ma charakter jakościowo-porównawczy i koncentruje się na analizie workflow oraz logiki modelowania parametrycznego. Badanie nie obejmuje bezpośredniej analizy konstrukcyjnej ani porównania wyników obliczeń statycznych (np. sił wewnętrznych, ugięć czy nośności), ponieważ wymagałoby to zastosowania zewnętrznych narzędzi analitycznych oraz wprowadzenia dodatkowych zmiennych niezależnych od samego środowiska modelowania.

4. Wyniki

W przypadku dachu o swobodnej geometrii zaobserwowano, że Grasshopper umożliwiał stabilne generowanie powierzchni oraz ich podział na elementy konstrukcyjne bez konieczności wprowadzania dodatkowych operacji korekcyjnych. Zmiany parametrów, takich jak rozstaw słupów czy krzywizna powierzchni, propagowały się w sposób ciągły i przewidywalny w całym modelu. Struktura drzew danych pozwalała na zachowanie relacji między elementami nawet przy złożonych przekształceniach geometrycznych. W analogicznym modelu wykonanym w Dynamo pojawiały się trudności związane z orientacją elementów oraz zależnością wyników od kolejności definiowania punktów i list danych. W bardziej złożonych iteracjach prowadziło to do konieczności ręcznej korekty geometrii lub przebudowy części skryptu. Zaobserwowano również większą wrażliwość modelu na sposób organizacji danych wejściowych, co wpływało na stabilność działania przy kolejnych zmianach parametrów.

W przypadku konstrukcji ramowej o regularnym układzie zaobserwowano odwrotną zależność. Dynamo umożliwiało bezpośrednio generowanie elementów konstrukcyjnych jako obiektów

BIM, co zapewniało ich spójność z modelem oraz automatyczne przypisanie parametrów, takich jak przekrój, materiał czy przynależność do kondygnacji. Zmiany parametrów geometrycznych były propagowane w ramach struktury modelu BIM, co umożliwiało zachowanie zgodności z dokumentacją oraz zestawieniami. W Grasshopperze uzyskanie analogicznego efektu wymagało dodatkowego etapu zarządzania strukturą danych oraz definiowania relacji między elementami konstrukcyjnymi. W przypadku układów powtarzalnych konieczne było ręczne kontrolowanie hierarchii danych oraz odniesień geometrycznych, co zwiększało złożoność procesu modelowania.

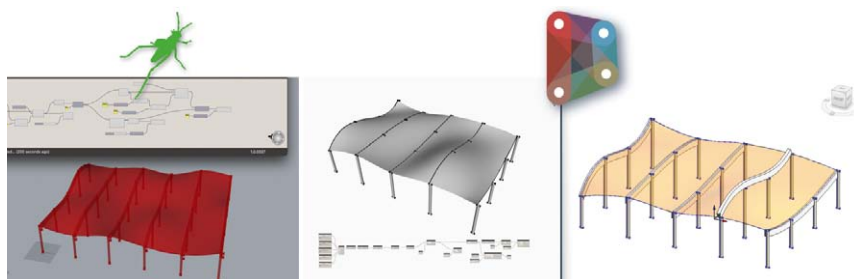
Różnice między środowiskami były szczególnie widoczne w sposobie zarządzania danymi i iteracjami. W Grasshopperze struktura drzew danych pozwalała na bardziej elastyczne operowanie złożonymi relacjami geometrycznymi, jednak wymagała świadomej organizacji przy pracy z układami regularnymi. W Dynamo operacje na listach były prostsze w przypadku struktur powtarzalnych, natomiast przy geometrii nieregularnej prowadziły do większej wrażliwości modelu na kolejność danych wejściowych.

Na podstawie przeprowadzonych modeli zidentyfikowano trzy główne różnice:

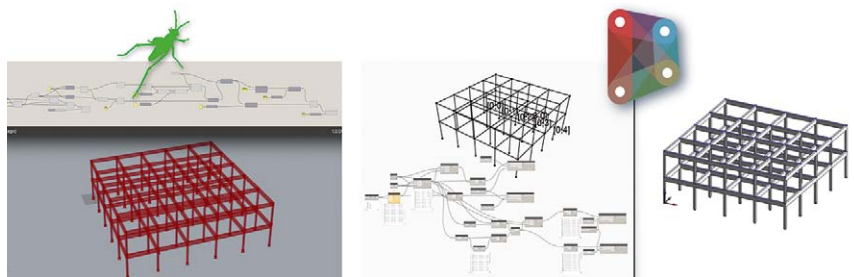
- stabilność propagacji zmian – wyższa w Grasshopperze dla geometrii swobodnej, wyższa w Dynamo dla modeli osadzonych w BIM,
 - wrażliwość na strukturę danych – większa w Dynamo przy złożonych relacjach geometrycznych,
 - złożoność iteracji – mniejsza w Grasshopperze dla form nieregularnych, mniejsza w Dynamo dla struktur powtarzalnych.
- Analiza wykazała, że różnice między narzędziami ujawniają się przede wszystkim na poziomie organizacji danych oraz stabilności procesu iteracyjnego, a nie w zakresie samych możliwości modelowania. Wyniki porównania zagregowano i przedstawiono w tabeli 1.

5. Podsumowanie

Przeprowadzone porównanie wskazuje, że różnice między Grasshopperem a Dynamo wynikają przede wszystkim z poziomu abstrakcji, na którym operują oba narzędzia. Narzędzia te nie stanowią rozwiązań konkurencyjnych, lecz uzupełniające się komponenty jednego workflow. Istotnym wnioskiem jest znaczenie zarządzania przepływem danych pomiędzy środowiskami. Przenoszenie modeli parametrycznych do środowiska BIM wiąże się z koniecznością translacji struktur danych, co może prowadzić do utraty relacji parametrycznych oraz zwiększenia złożoności procesu projektowego. W praktyce oznacza to, że



Rys. 2. Projekt parametryczny dachu o swobodnej formie w Grasshopperze (po lewej) oraz w Dynamo (po prawej) (opracowanie własne)



Rys. 3. Projekt parametryczny wielokondygnacyjnej konstrukcji regularnej w Grasshopperze (po lewej) oraz w Dynamo (po prawej) (opracowanie własne)

efektywność zastosowania obu narzędzi zależy nie tylko od ich możliwości, lecz także od sposobu organizacji procesu projektowego i momentu ich wykorzystania.

Wyniki wskazują, że największą efektywność można osiągnąć poprzez świadome łączenie obu środowisk: wykorzystanie Grasshoppera do generowania i optymalizacji formy oraz Dynamo do jej implementacji i dalszego rozwijania w modelu BIM. Takie podejście pozwala ograniczyć ograniczenia każdego z narzędzi i zapewnić ciągłość procesu od etapu koncepcyjnego do dokumentacji wykonawczej.

W przyszłych badaniach zasadne jest rozszerzenie analizy o podejście ilościowe, które umożliwi porównanie efektywności narzędzi na podstawie mierzalnych wskaźników, takich jak czas modelowania, liczba operacji czy stabilność skryptów. Dodatkowo istotnym kierunkiem rozwoju jest wykorzystanie metod sztucznej inteligencji do automatyzacji translacji modeli parametrycznych do środowiska BIM, co może ograniczyć obecne bariery integracyjne i poprawić efektywność całego procesu projektowego.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Eltaweel A., SU Y., Parametric design and daylighting: A literature review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 73, 2017, str. 1086–1103, doi: 10.1016/j.rser.2017.02.011
- [2] Farouk A., Eldaly H., Dewidar K., Parametric design as a tool for performative architecture, *Journal of Al-Azhar University Engineering Sector* 14, 50, 2019, str. 148–157, doi: 10.21608/aej.2019.28490
- [3] Nasir O., Arif K., Exploring the role of parametric architecture in building design: An inclusive approach, *Facta universitatis – series: Architecture and Civil Engineering* 21, 1/2023, str. 95–114, doi: 10.2298/FUACE230114007N
- [4] Yavan F., Maalek R., Toğan V., Structural Optimization of Trusses in Building Information Modeling (BIM) Projects Using Visual Programming, *Evolutionary Algorithms, and Life Cycle Assessment (LCA) Tools*, *Buildings* 14, 6/2024, art. 1532, doi: 10.3390/buildings14061532

Tabela 1. Podsumowanie wyników – porównanie Grasshoppera i Dynamo

Grasshopper (Rhino3D)	Dynamo (Revit)
Kryterium I. Reprezentacja i organizacja geometrii	
W modelu zaobserwowano wysoką swobodę kształtowania geometrii, szczególnie form swobodnych i nieregularnych. Geometria oparta na NURBS umożliwia precyzyjne modelowanie powierzchni oraz ich podział na elementy konstrukcyjne. System dobrze radzi sobie z ciągłością powierzchni, adaptacyjnymi siatkami oraz nieregularnymi układami konstrukcyjnymi.	Geometria tworzona bezpośrednio jako elementy BIM, powiązane z kategoriami i parametrami. Stabilne generowanie układów modułowych i wielokondygnacyjnych. W przypadku geometrii swobodnej pojawiają się ograniczenia, szczególnie gdy wynik zależy od kolejności punktów lub kierunku wektorów.
Kryterium II. Zarządzanie strukturami danych	
Struktura drzew danych umożliwia precyzyjne zarządzanie zależnościami między elementami oraz operowanie na złożonych relacjach geometrycznych. Wymaga jednak świadomej organizacji danych, szczególnie w systemach powtarzalnych.	Struktura danych oparta głównie na listach, co upraszcza operacje na zbiorach elementów w układach regularnych. W przypadku złożonych relacji geometrycznych może wymagać dodatkowego mapowania list oraz bardziej kontrolowanego przepływu danych.
Kryterium III. Propagacja zmian parametrów	
Zmiana parametru automatycznie propaguje się przez cały model, zachowując ciągłość relacji geometrycznych. System zapewnia przewidywalną aktualizację elementów nawet przy złożonych przekształceniach.	Propagacja zmian odbywa się w ramach hierarchii BIM, co zapewnia spójność z dokumentacją i parametrami modelu. W bardziej złożonych układach zależność od struktury danych może wpływać na sposób rozchodzenia się zmian.
Kryterium IV. Stabilność i przewidywalność działania	
W modelach o złożonej geometrii zaobserwowano wysoką stabilność działania oraz przewidywalność wyników, wynikającą z jawnie definiowanych relacji i struktury danych.	W przypadku bardziej złożonych operacji geometrycznych pojawia się większa wrażliwość na kolejność danych wejściowych oraz sposób ich organizacji. Może to prowadzić do mniej przewidywalnych rezultatów i konieczności korekty skryptu.
Kryterium V. Iteracyjność i łatwość modyfikacji modelu	
Umożliwia szybkie iteracje projektowe i łatwe modyfikowanie geometrii poprzez zmianę parametrów. Szczególnie efektywny w pracy z formami nieregularnymi i procesami eksploracyjnymi.	Ułatwia iteracyjne modyfikacje w ramach modeli BIM, szczególnie w strukturach powtarzalnych i hierarchicznych. W bardziej złożonych przypadkach zmiany mogą wymagać przebudowy części skryptu.
Kryterium VI. Integracja z BIM i narzędziami analitycznymi	
Integracja z narzędziami analitycznymi poprzez wtyczki, takie jak Karamba3D, umożliwia analizę sił, ugięć i wykorzystania materiału w czasie rzeczywistym. Analiza odbywa się głównie na poziomie koncepcyjnym, bez pełnego osadzenia w strukturze BIM. Możliwy eksport przez IFC lub Rhino.Inside.Revit, jednak wymaga dodatkowego mapowania danych.	Pełna integracja z BIM. każdy element posiada przypisane parametry (materiał, przekrój, identyfikator). Automatyczne tworzenie elementów konstrukcyjnych zgodnie z normami i logiką modelu. Brak natywnej analizy konstrukcyjnej w czasie rzeczywistym, konieczne połączenie z narzędziami zewnętrznymi, np. Robot Structural Analysis. Silne wsparcie dla dokumentacji i koordynacji międzybranżowej.

[5] Waas L., Enjellina, Review of BIM-Based Software in Architectural Design: Graphisoft Archicad VS Autodesk Revit, Journal of Artificial Intelligence in Architecture 1, 2/2022, str. 14–22, doi: 10.24002/jarina.v1i2.6016

[6] Jiang P., Positional Control in Node-Based Programming, in Extended Abstracts of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, New York, NY, USA: ACM, 4/2023, str. 1–7, doi: 10.1145/354454

[7] Hamidavi T., Abrishami S., Ponterosso P., Begg D., Nanos N., OSD, Construction Innovation 20, 2/2020, str. 149–169, doi: 10.1108/CI-11-2019-0126

[8] Caetano I., Santos L., Leitão A., Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design, Frontiers of Architectural Research 9, 2/2020, str. 287–300, doi: 10.1016/j.foar.2019.12.008

[9] Abbasli U., Avinç G. M., Selçuk S. A., A parametric design offering affordances for the children of digital world: playground inspired by Voronoi, Architectus 1(73)2023, doi: 10.37190/arc230112

[10] Dzwierzynska J., Integrated Parametric Shaping of Curvilinear Steel Bar Structures of Canopy Roofs, Buildings 9, 3/2019, str. 72, doi: 10.3390/buildings9030072

[11] Carthy E., Lakhera O'Shea K., How can visual programming be used to aid the development of a structural scheme design process utilising geometric data within an Architectural Revit model? 2023, doi: 10.21427/QZYF-EV62

[12] Zimmermann Machado D., Quadrado Mussi A., Dynamo, Grasshopper and their plugins: User opinion, usability and dissemination of knowledge, in Blucher Design Proceedings, São Paulo: Editora Blucher 6/2024, str. 242–253, doi: 10.5151/sigradi2023-11

[13] Yan G., Jia Y., Zhen M., Dong Q., Integrated design and fabrication of additive manufacturing-based shading components with daylight performance optimization, Journal of Building Engineering 114, 11/2025, art. 114416, doi: 10.1016/j.jobe.2025.114416

[14] Fattahi Tabasi S., Luo D., Rafizadeh H. R., Le Nguyen K., Banihashemi S., Generative optimization of building blocks for density, solar and structural performance, Journal of Building Engineering 111, 10/2025, art. 113307, doi: 10.1016/j.jobe.2025.113307

[15] Wojslaw K., FEM in Grasshopper – The ultimate analysis software list, BIM Corner. Accessed: 16, 2025, online, Available: <https://bimcorner.com/fem-in-grasshopper-the-ultimate-analysis-software-list/>

[16] Khan H., Microclimatic architectural design by interfacing grasshoppers and Dynamo with Rhino and Revit, Measurement: Sensors 33, 6/2024, art. 101143, doi: 10.1016/j.measen.2024.101143

[17] Lo Turco M., Giovannini E. C., Tomalini A., Parametric and Visual Programming BIM Applied to Museums, Linking Container and Content, ISPRS Int. J. GeoInf., 11, 7/2022, str. 411, doi: 10.3390/ijgi11070411

[18] Seghier T. E., Khosakitchalart C., Liu Z., Ohueri C. C., Lim Y.-W., Bin Zainazlan A. F., From BIM to computational BIM: A systematic review of visual programming application in building research, Ain Shams Engineering Journal 16, 1/2025, art. 103173, doi: 10.1016/j.asej.2024.103173

[19] Collao J., Lozano-Galant F., Lozano-Galant J. A., Turmo J., BIM Visual Programming Tools Applications in Infrastructure Projects: A State-of-the-Art Review, Applied Sciences 11, 18, 2021, art. 8343, doi: 10.3390/app11188343

[20] Wu S., Ramli M. Z., Ngian S. P., Qiao G., Jiang B., Review on parametric building information modelling and forward design approaches for sustainable bridge engineering, Discover Applied Sciences 7, 2/2025, str. 127, doi: 10.1007/s42452-025-06543-y

[21] Ko J., Ajibefun J., Yan W., Generative AI-powered parametric modeling and BIM for architectural design and visualization, Proceedings of the Design Society, 5, 8/2025, str. 1943–1952, doi: 10.1017/pds.2025.10208

[22] Ajtayné Károlyfi K., Szép J., A Parametric BIM Framework to Conceptual Structural Design for Assessing the Embodied Environmental Impact, Sustainability 15(15)2023, art. 11990, doi: 10.3390/su151511990

Porównanie metody Galerkina i metody Petrova w analizie belki zginanej

Comparison of the Galerkin and Petrov methods in the analysis of a bending beam

dr inż. Mykola Nagirniak (ORCID: 0000-0003-4996-7397), dr inż. Mateusz Dryzek (ORCID: 0000-0003-3148-5517), Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7927

Streszczenie: W pracy porównano metodę Galerkina i metodę Petrova w analizie belki przegubowej poddanej obciążeniu stałemu oraz sinusoidalnemu. Wyznaczono cztery kluczowe wielkości: maksymalne ugięcie, moment zginający, siłę tnącą oraz energię potencjalną, a następnie zestawiono je z rozwiązaniami ścisłymi. W metodzie Galerkina zastosowano funkcję ortogonalizującą tożsamą z funkcją aproksymującą, natomiast w metodzie Petrova – funkcję od niej różną. Wyniki przedstawiono w formie tabelarycznej i graficznej. Analiza wykazała, że obie metody zapewniają wysoką zgodność z rozwiązaniami analitycznymi, przy czym metoda Petrova charakteryzuje się nieco mniejszym błędem w przypadku obciążeń zmiennych. Dodatkowo przeprowadzono obliczenia klasyczną metodą elementów skończonych z funkcjami Hermite’a, uzyskując zbliżony poziom błędów, rozwiązując zadanie 4 elementami skończonymi.

Słowa kluczowe: metoda Galerkina, metoda Petrova, belka zginana, obciążenie sinusoidalne, obciążenie równomierne.

Abstract: In this study, the Galerkin method and the Petrov method are compared in the analysis of a simply supported beam subjected to uniform and sinusoidal loading. Four key quantities were determined: maximum deflection, bending moment, shear force, and potential energy, and subsequently compared with exact analytical solutions. In the Galerkin method, the weighting function is identical to the approximation function, whereas in the Petrov method these functions differ. The results are presented in both tabular and graphical form. The analysis shows that both methods provide high accuracy relative to the analytical solutions, with the Petrov method exhibiting slightly smaller errors in the case of variable loading. Additionally, computations were performed using the classical finite element method with Hermite shape functions. A comparable error level was achieved by solving the problem with four finite elements.

Keywords: Galerkin method, Petrov method, bending beam, sinusoidal loading, uniform loading.

1. Wprowadzenie

Rozwiązywanie równań różniczkowych opisujących ugięcia elementów konstrukcyjnych stanowi jedno z podstawowych zagadnień mechaniki budowli. W przypadku belek zginanych, opisywanych równaniem różniczkowym czwartego rzędu, kluczowe jest precyzyjne wyznaczenie przemieszczeń, momentów zginających i energii odkształcenia [1]. W praktyce inżynierskiej, gdy rozwiązania ścisłe są trudne do uzyskania, powszechnie stosuje się metody aproksymacyjne [2], umożliwiające efektywną analizę i ocenę bezpieczeństwa konstrukcji.

Metody aproksymacyjne polegają na zastąpieniu rozwiązania dokładnego funkcją przybliżoną i spełnieniu równań równowagi w sensie całkowym. Szczególne znaczenie mają tu metody Galerkina [3] i Petrova [4], szeroko stosowane w analizie układów ciągłych, zwłaszcza w zagadnieniach zginania belek, płyt i powłok [5]. W metodzie Galerkina funkcja aproksymująca pełni również rolę funkcji ortogonalizującej,

podczas gdy metoda Petrova dopuszcza ich rozdzielenie. Rozwinięciem tych podejść jest metoda elementów skończonych (MES), oparta głównie na metodzie Galerkina, która dzięki swojej uniwersalności stała się standardem w nowoczesnych programach obliczeniowych.

Metody Galerkina i Petrova są szeroko stosowane w analizie równań belek, w tym równań Eulera-Bernoulliego. Youssri i in. [6] zaproponowali efektywny schemat Petrova-Galerkina oparty na wielomianach Czebyszewa, uzyskując wysoką dokładność przy złożonych warunkach brzegowych. Inne badania potwierdzają skuteczność tej metody w rozwiązywaniu równań czwartego rzędu [7], a Raju [8] wykazał przydatność metody MLPG (Meshless Local Petrov-Galerkin) w analizie belek z nieciągłymi obciążeniami. Zastosowania metody Petrova-Galerkina obejmują również belki Rayleigha, gdzie wykorzystuje się wielomiany Laguerre’a i Gegenbauera [9], co potwierdza jej uniwersalność.

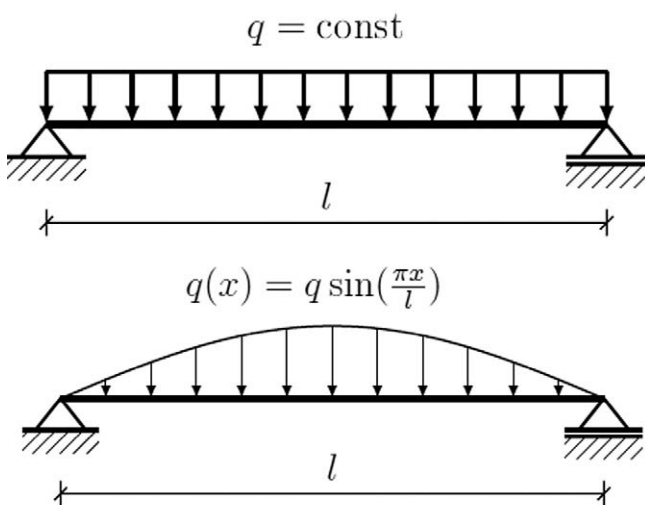
W niniejszej pracy rozpatrzono dwa klasyczne przypadki obciążenia belki: obciążenie stałe oraz obciążenie sinusoidalne.

Dla obu przypadków przedstawiono rozwiązania ściśle oraz rozwiązania przybliżone uzyskane metodą Galerkina i metodą Petrova. Dodatkowo przeprowadzono obliczenia klasyczną metodą MES z funkcjami Hermita stosując 4 elementy skończone. Analizie poddano cztery wielkości fizyczne: ugięcie, moment zginający, siłę tnącą oraz energię potencjalną układu. Porównanie wyników uzyskanych obiema metodami z rozwiązaniami ścisłymi pozwala ocenić ich dokładność oraz przydatność w analizie konstrukcji.

Celem niniejszej pracy jest ilościowe porównanie efektywności metod Galerkina i Petrova w analizie belki zginanej, poprzez zestawienie wyników uzyskanych obiema metodami z rozwiązaniami ścisłymi dla dwóch typów obciążeń. Przedstawione wyniki umożliwiają ocenę błędów aproksymacji oraz wskazują, w jakich sytuacjach dana metoda zapewnia większą dokładność.

2. Metody badawcze

Rozpatrzmy belkę zginaną obciążeniem stałym oraz górką sinusoidalną, pokazane na rysunku 1. W celu porównania metody Galerkina i Petrova wyznaczmy cztery wielkości: maksymalne ugięcie, maksymalny moment, maksymalną siłę tnącą i wartość energii potencjalnej w każdym rozpatrywanym przypadku.



Rys. 1. Belka poddana obciążeniu: a) stałemu, b) sinusoidalnemu

2.1. Rozwiązanie ściśle

W celu wygody obliczeń wprowadźmy współrzędną bezwymiarową $\xi = \frac{x}{l}$. Równanie różniczkowe równowagi belki Bernoulliego-Eulera zapiszemy w postaci:

$$\frac{d^4 w(\xi)}{d\xi^4} - \frac{q(\xi)l^4}{EJ} = 0 \quad (1)$$

z warunkami brzegowymi:

$$w|_{\xi=0} = 0, \quad w|_{\xi=1} = 0, \quad \frac{d^2 w}{d\xi^2}|_{\xi=0} = 0, \quad \frac{d^2 w}{d\xi^2}|_{\xi=1} = 0 \quad (2)$$

Momenty zginające oraz siły tnące zapiszemy w postaci:

$$M(\xi) = -\frac{EJ}{l^2} \frac{d^2 w}{d\xi^2}, \quad T(x) = -\frac{EJ}{l^3} \frac{d^3 w}{d\xi^3} \quad (3)$$

Energia potencjalna układu wynosi:

$$\Pi = \frac{l}{2EJ} \int_0^1 M^2(\xi) d\xi - l \int_0^1 q(\xi) w(\xi) d\xi \quad (4)$$

gdzie: EJ : sztywność na zginanie (E – moduł Younga, J – moment bezwładności przekroju).

2.2. Rozwiązanie przybliżone

Założmy funkcje ugięcia w postaci:

$$w(\xi) = C_1 \psi(\xi) \quad (5)$$

w której $\psi(\xi)$ jest funkcją aproksymującą.

Funkcję momentu zginającego zapiszemy następująco:

$$M(\xi) = -\frac{EJ}{l^2} C_1 \frac{d^2 \psi(\xi)}{d\xi^2} \quad (6)$$

Funkcja sił tnących przyjmuje postać:

$$T(\xi) = -\frac{EJ}{l^3} C_1 \frac{d^3 \psi(\xi)}{d\xi^3} \quad (7)$$

Wzór na energię potencjalną przyjmuje postać:

$$\Pi = \frac{EJ}{2l^3} C_1^2 \int_0^1 [\psi''(\xi)]^2 d\xi - C_1 l \int_0^1 q(\xi) \psi(\xi) d\xi \quad (8)$$

Podstawiając (5) do równania (1) otrzymujemy:

$$f(\xi) = C_1 \frac{d^4 \psi(\xi)}{d\xi^4} - \frac{q(\xi)l^4}{EJ} \quad (9)$$

Stałą C_1 znajdujemy metodą Galerkina i Petrova. Funkcja aproksymująca $\psi(\xi)$ musi bezwzględnie spełniać kinematyczne warunki brzegowe belki, ponieważ są one warunkiem koniecznym metody, natomiast statyczne warunki brzegowe mogą być jedynie przybliżone.

Metoda Galerkina

W tej metodzie funkcją ortogonalizującą jest funkcja aproksymująca, tj:

$$\int_0^1 f(x) \psi(x) dx = 0 \quad (10)$$

Przyjmując funkcję $\psi(\xi)$ znajdziemy stałą C_1 , a następnie ugięcia, momenty zginające, siły tnące i energie potencjalną ze wzorów (5)–(8).

Metoda Petrova

W tej metodzie funkcja ortogonalizująca jest różna od funkcji aproksymującej, tj:

$$\int_0^l f(x) \chi(\xi) d\xi = 0 \quad (11)$$

gdzie $\chi(\xi)$ – funkcja ortogonalizująca metody Petrova.

3. Wyniki

3.1. Obciążenie równomiernie rozłożone

Rozpatrzmy belkę pokazaną na rysunku 1a.

Niech $q(\xi) = q = \text{const}$

Rozwiązanie ścisłe

Funkcja ugięcia w tym przypadku przyjmie postać:

$$w(\xi) = \frac{ql^4}{24EJ} \xi(1 - 2\xi^2 + \xi^3) \quad (12)$$

Momenty zginające i siły tnące zapiszemy w postaci:

$$M(x) = \frac{ql^2}{2} (1 - \xi)\xi, \quad T(x) = \frac{ql}{2} (1 - 2\xi) \quad (13)$$

natomiast energia potencjalna przyjmie postać:

$$\Pi = -\frac{q^2 l^5}{240EJ} \quad (14)$$

Rozwiązanie metodą Galerkin

Założmy funkcję aproksymującą w postaci:

$$\psi(\xi) = \sin(\pi\xi) \quad (15)$$

Funkcja ugięcia w tym przypadku przyjmie postać:

$$w(\xi) = C_1 \sin(\pi\xi) \quad (16)$$

Funkcje momentu zginającego oraz sił tnących zapiszemy w postaci:

$$\begin{aligned} M(\xi) &= \frac{EJ\pi^2}{l^2} C_1 \sin(\pi\xi), \\ T(\xi) &= \frac{EJ\pi^3}{l^3} C_1 \cos(\pi\xi) \end{aligned} \quad (17)$$

natomiast energię potencjalną w postaci:

$$\Pi = \frac{C_1^2 EJ\pi^4}{4l^3} - \frac{2C_1 ql}{\pi} \quad (18)$$

Podstawiając (15) do równania (10) otrzymamy:

$$f(\xi) = C_1 \pi^4 \sin(\pi\xi) - \frac{l^4 q}{EJ} \quad (19)$$

Podstawiając funkcję $f(\xi)$ (17) do równania (10) i wykonaniu całkowania, otrzymamy stałą C_1 , którą zapiszemy w postaci:

$$C_1 = \frac{4ql^4}{\pi^5 EJ} \quad (20)$$

Podstawiając (20) do (16)–(18) otrzymamy:

$$\begin{aligned} w(\xi) &= \frac{4ql^4 \sin(\pi\xi)}{\pi^5 EJ}, \quad M(\xi) = \frac{4ql^2 \sin(\pi\xi)}{\pi^3} \\ T(\xi) &= \frac{4ql \cos(\pi\xi)}{\pi^2}, \quad \Pi(\xi) = -\frac{4q^2 l^5}{\pi^6 EJ} \end{aligned} \quad (21)$$

Rozwiązanie metodą Petrova

Funkcję aproksymującą zakładamy w postaci (15). Niech funkcja ortogonalizująca będzie postaci:

$$\chi(\xi) = \xi(1 - \xi)(1 + \xi - \xi^2) \quad (22)$$

Z równania (11) otrzymujemy:

$$C_1 = \frac{\pi ql^4}{240EJ} \quad (23)$$

Podstawiając (23) do (16)–(18) otrzymamy:

$$\begin{aligned} w(\xi) &= \frac{\pi ql^4 \sin(\pi\xi)}{240EJ}, \quad M(\xi) = \frac{\pi^3 ql^2}{240} \sin(\pi\xi) \\ T(\xi) &= \frac{\pi^4 ql}{240} \cos(\pi\xi), \quad \Pi(\xi) = -\frac{(\pi^6 - 1920) q^2 l^5}{230400EJ} \end{aligned} \quad (24)$$

3.2. Obciążenie sinusoidalne

Rozpatrzmy belkę pokazaną na rysunku 1b.

Niech $q(\xi) = q \sin(\pi\xi)$

Rozwiązanie ścisłe

Funkcja ugięcia w tym przypadku przyjmie postać:

$$w(\xi) = \frac{ql^4 \sin(\pi\xi)}{\pi^4 EJ} \quad (25)$$

Momenty zginające i siły tnące zapiszemy w postaci:

$$M(x) = \frac{ql^2 \sin(\pi\xi)}{\pi^2}, \quad T(x) = \frac{ql \cos(\pi\xi)}{\pi} \quad (26)$$

natomiast energia potencjalna przyjmie postać:

$$\Pi = -\frac{q^2 l^5}{4EJ\pi^4} \quad (27)$$

Rozwiązanie metodą Galerkin

Założmy funkcję aproksymującą w postaci:

$$\psi(\xi) = \xi - 2\xi^3 + \xi^4 \quad (28)$$

Funkcja ugięcia w tym przypadku przyjmie postać:

$$w(\xi) = C_1 (\xi - 2\xi^3 + \xi^4) \quad (29)$$

Funkcje momentu zginającego oraz sił tnących zapiszemy w postaci:

$$\begin{aligned} M(\xi) &= \frac{12EJ}{l^2} C_1 (1 - \xi)\xi, \\ T(\xi) &= \frac{12EJ}{l^3} C_1 (1 - 2\xi) \end{aligned} \quad (30)$$

natomiast energię potencjalną w postaci:

$$\Pi = \frac{12C_1^2 EJ}{5l^3} - \frac{48C_1 ql}{\pi^5} \quad (31)$$

Podstawiając (15) do równania (10) otrzymamy:

$$f(\xi) = 24C_1 - \frac{ql^4 \sin(\pi\xi)}{EJ} \quad (32)$$

Podstawiając funkcje $f(\xi)$ (32) do równania (10) i wykonaniu całkowania, otrzymamy stałą C_1 , którą zapiszemy w postaci:

$$C_1 = \frac{10ql^4}{\pi^5 EJ} \quad (33)$$

Podstawiając (33) do (16)–(18) otrzymamy:

$$w(\xi) = \frac{10ql^4 (\xi - 2\xi^3 + \xi^4)}{\pi^5 EJ}, \quad M(\xi) = \frac{120ql^2}{\pi^5} (1 - \xi)\xi \quad (34)$$

$$T(\xi) = \frac{120ql}{\pi^5} (1 - 2\xi), \quad \Pi(\xi) = -\frac{240q^2 l^5}{\pi^{10} EJ}$$

Rozwiązanie metodą Petrova

Funkcje aproksymującą zakładamy w postaci (28). Niech funkcja ortogonalizująca będzie postaci:

$$\chi(\xi) = \sin(\pi\xi) \quad (35)$$

Z równania (11) otrzymujemy:

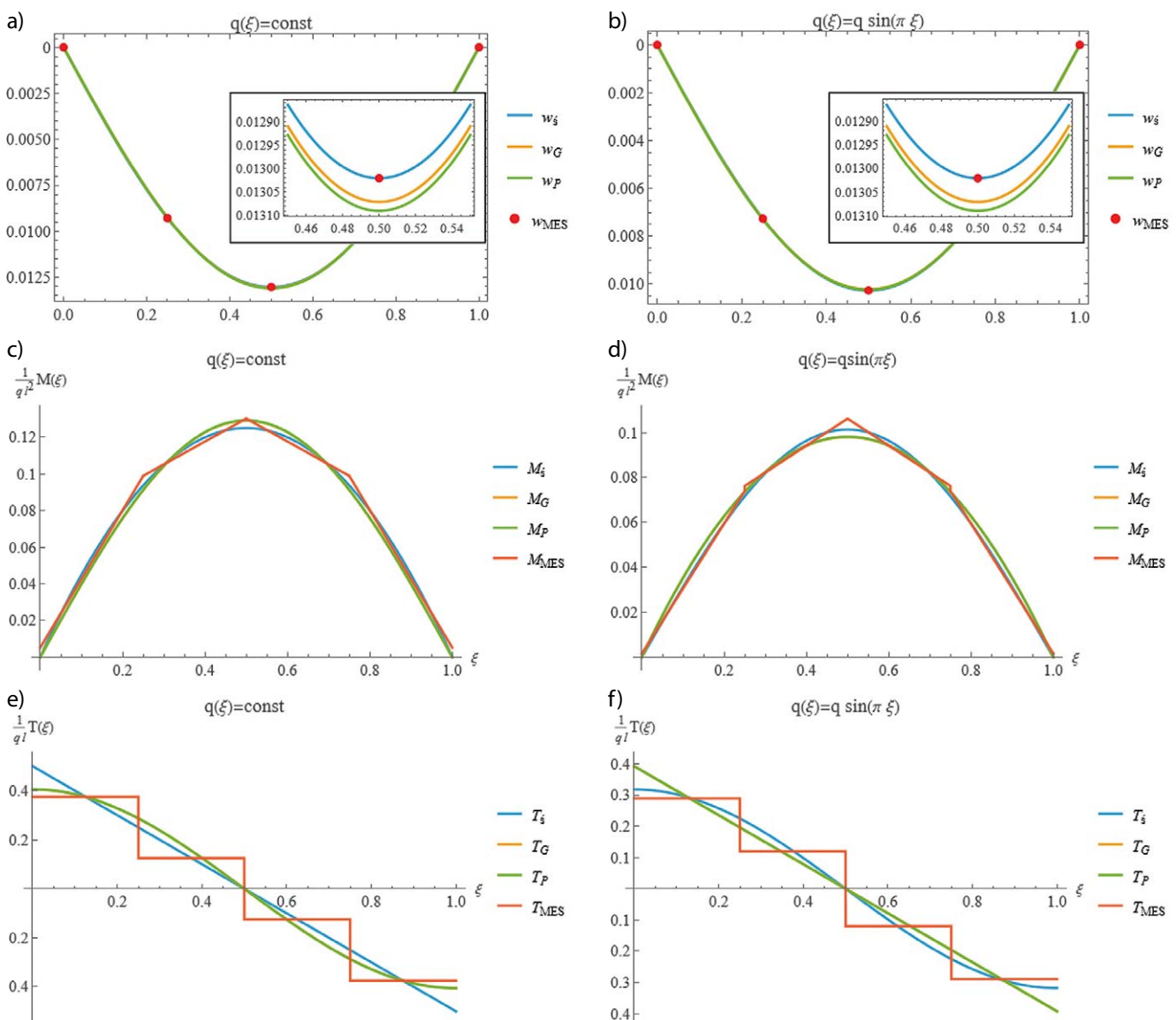
$$C_1 = \frac{\pi ql^4}{96 EJ} \quad (36)$$

Podstawiając (36) do (16)–(18) otrzymamy:

$$w(\xi) = \frac{\pi ql^4 (\xi - 2\xi^3 + \xi^4)}{96 EJ}, \quad M(\xi) = \frac{\pi ql^2}{8} (1 - \xi)\xi \quad (37)$$

$$T(\xi) = \frac{\pi ql}{8} (1 - 2\xi), \quad \Pi(\xi) = -\frac{(1920 - \pi^6) q^2 l^5}{3840 \pi^4 EJ}$$

Ugięcia, momenty i siły tnące dla rozwiązań: ścisłego (ś), Galerkina (G), Petrova (P) oraz MES porównano na rysunku 2. W metodzie elementów skończonych przyjęto cztery elementy z funkcjami Hermite'a 3. stopnia, a pochodne wyznaczono dla każdego elementu osobno, bez uśredniania w węzłach.



Rys. 2. Porównanie wartości analitycznych i przybliżonych dla: a, b) ugięć, c, d) momentów, e, f) sił tnących; przypadki obciążeń: $q = \text{const}$ (a, c, e) oraz $q = q \sin(\pi\xi)$ (b, d, f)

Tabela 1. Porównanie ekstremalnych wartości

Obciążenie	Wartości ekstremalne	Wartości ścisłe	Metoda Galerkina	Błąd [%]	Metoda Petrova	Błąd [%]
$q(\xi) = \text{const}$	$\frac{EJ}{ql^4} w_{\max}$	$\frac{5}{384}$	$\frac{4}{\pi^5}$	0,386	$\frac{\pi}{240}$	0,531
	$\frac{1}{ql^2} M_{\max}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{4}{\pi^3}$	3,205	$\frac{\pi^3}{240}$	3,354
	$\frac{1}{ql} T_{\max}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{4}{\pi^2}$	18,943	$\frac{\pi^4}{240}$	18,825
	$\frac{EJ}{q^2 l^5} \Pi$	$-\frac{1}{240}$	$-\frac{4}{\pi^6}$	0,144	$\frac{\pi^6 - 1920}{230400}$	0,145
$q(\xi) = q \sin(\pi \xi)$	$\frac{EJ}{ql^4} w_{\max}$	$\frac{1}{\pi^4}$	$\frac{25}{8\pi^5}$	0,528	$\frac{5\pi}{1536}$	0,384
	$\frac{1}{ql^2} M_{\max}$	$\frac{1}{\pi^2}$	$\frac{30}{\pi^5}$	3,245	$\frac{\pi}{32}$	3,105
	$\frac{1}{ql} T_{\max}$	$\frac{1}{\pi}$	$\frac{120}{\pi^5}$	23,192	$\frac{\pi}{8}$	23,370
	$\frac{EJ}{q^2 l^5} \Pi$	$-\frac{1}{4\pi^4}$	$-\frac{240}{\pi^{10}}$	0,144	$\frac{\pi^6 - 1920}{3840\pi^4}$	0,145

W przypadku ugięć (rys. 2a, 2b) obie metody poprawnie odwzorowują przebieg funkcji wzdłuż długości belki. Analiza przebiegu momentów zginających (rys. 2c–2d) wskazuje na bardzo dobrą zgodność rozwiązań, z jedynie nieznacznymi rozbieżnościami w strefie maksymalnych wartości ekstremalnych (w środku rozpiętości). Zauważalne odstępstwa od rozwiązania analitycznego odnotowano natomiast w przypadku rozkładu sił tnących (rys. 2f–2e), w szczególności w strefach przypodporowych ($\xi = 0$ oraz $\xi = 1$).

Wartości ekstremalne uzyskane metodami Galerkina i Petrova z rozwiązaniami ścisłymi porównano w tabeli 1. Dla ugięć i energii potencjalnej błędy obu metod są bardzo małe (poniżej 1%), a dla momentów zginających nie przekraczają 3,5%. Największe różnice dotyczą sił tnących, gdzie błędy sięgają 18–23%. Metoda Petrova daje nieco dokładniejsze wyniki, choć różnice względem Galerkina są niewielkie.

4. Podsumowanie

W pracy przeprowadzono porównanie metody Galerkina i metody Petrova w analizie belki przegubowej poddanej obciążeniu stałemu oraz sinusoidalnemu. Wyniki uzyskane obiema metodami wykazują bardzo dobrą zgodność z rozwiązaniami ścisłymi dla ugięć, momentów zginających oraz energii potencjalnej, przy błędach względnych nieprzekraczających 1%. Największe różnice pomiędzy metodami obserwuje się w przypadku sił tnących, co wynika z ich wrażliwości na błędy aproksymacji ugięcia. Mimo to obie metody poprawnie odwzorowują przebieg funkcji i wartości ekstremalne. Należy podkreślić, że uzyskane wyniki dotyczą wyłącznie belki przegubowej i dwóch prostych typów

obciążeń. Dla innych warunków brzegowych oraz bardziej złożonych obciążeń dokładność metod Galerkina i Petrova może ulec pogorszeniu.

Podsumowując, obie metody stanowią efektywne narzędzia do analizy belek zginanych w warunkach typowych, jednak ich skuteczność zależy od właściwego doboru funkcji bazowych oraz od specyfiki zadania. W zastosowaniach obejmujących bardziej złożone układy konieczne może być stosowanie metod numerycznych o szerszym zakresie zastosowań, takich jak MES.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Stephen P., Timoshenko, James M. Gere, Theory of elastic stability, New York: McGraw Hill Book, 1961
- [2] Reddy D. J. N., An Introduction to the Finite Element Method. McGraw-Hill Education, 2005, (online), Available: <https://books.google.pl/books?id=8ofqngEACAAJ>
- [3] Galérkin B. G., Rády v nekotoryh voprosah uprugogo ravnovesiá sterzhnej i plastinok, Vestn. Inž., tom 1, 19, 1915, str. 897–908
- [4] Petrov G. I., Primenenie metoda Galerkina k zadache ob ustojčivosti tečeniá vžkoj židkosti, J. Aplied Math. Mech., tom 4, 3/1940, str. 3–11
- [5] Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Zhu J. Z., The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals, Amsterdam: Elsevier, 2013
- [6] Youssri Y. H., Abd-Elhameed W. M., Elmasry A. A., Atta A. G., An Efficient Petrov–Galerkin Scheme for the Euler–Bernoulli Beam Equation via Second-Kind Chebyshev Polynomials, Fractal Fract., tom 9, 2/2025, doi: 10.3390/fractalfract9020078
- [7] Youssri Y. H., Atta A. G., Abu Waar Z. Y., Moustafa M. O., Petrov–Galerkin method for small deflections in fourth-order beam equations in civil engineering, tom 3, 1/2024, doi: 10.1515/nleng-2024-0022
- [8] Raju I., Meshless Local Petrov Galerkin (MLPG) Method with Orthogonal Polynomials for Euler–Bernoulli Beam Problems, in AIAA Scitech 2019 Forum, in AIAA SciTech Forum, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2019, doi: 10.2514/6.2019-0707
- [9] Panchore V., Meshless Petrov–Galerkin Method for Rotating Rayleigh Beam Using Laguerre and Gegenbauer Polynomials, J. Vib. Eng. Technol., tom 11, 7/2023, str. 2889–2902, doi: 10.1007/s42417-022-00719-1

Model 3D swobodnych drgań anizotropowych kompozytowych powłok cylindrycznych

3D Model of Free Vibrations of Anisotropic Composite Cylindrical Shells

dr hab. Volodymyr Trach, prof. uczelni (ORCID: 0000-0001-9500-2743), dr nauk technicznych Mykola Khoruzhyi (ORCID: 0000-0002-4546-9270), Narodowy Uniwersytet Gospodarki Wodnej i Zarządzania Zasobami Naturalnymi, Równe, Ukraina, dr hab. Andrii Podvornyi (ORCID: 0000-0001-8518-4395), Instytut Inżynierii Lądowej, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, dr nauk fizyczno-matematycznych Natalia Zhukova (ORCID: 0000-0002-2699-3771), Instytut Mechaniki im. S.P. Timoszenki NAN Ukrainy, Kijów, Ukraina

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7929

Streszczenie: W artykule zaproponowano podejście do rozwiązania zagadnienia swobodnych drgań grubościennych anizotropowych kompozytowych powłok cylindrycznych w sformułowaniu trójwymiarowym. Przedstawiono i wyprowadzono, przy wykorzystaniu zmodyfikowanej zasady wariacyjnej Hu-Washizu, trójwymiarowy układ równań ruchu liniowej teorii sprężystości. Zaproponowano metodę redukcji otrzymanego układu do postaci jednowymiarowej na podstawie procedury analitycznej metody Bubnowa-Galerkina. Przy zastosowaniu zaproponowanego podejścia przeprowadzono analizę częstotliwości drgań swobodnych anizotropowych cylindrycznych konstrukcji powłokowych w ujęciu przestrzennym.

Słowa kluczowe: anizotropowa powłoka kompozytowa, trójwymiarowa postać, częstotliwości swobodnych drgań, metoda Bubnowa-Galerkina.

Abstract: A proposed approach is presented for solving the problem of free vibrations of thick-walled anisotropic composite cylindrical shells in a three-dimensional formulation. A three-dimensional system of equations of motion of the linear theory of elasticity is derived using a modification of the Hu-Washizu variational principle. A method is proposed for reducing the resulting system to a one-dimensional form based on the analytical Bubnov-Galerkin procedure. Using the proposed approach, an analysis of the free vibration frequencies of anisotropic cylindrical shell structures is performed in a spatial formulation.

Keywords: anisotropic composite shell, three-dimensional formulation, free vibration frequencies, Bubnov-Galerkin method.

1. Wprowadzenie

Analiza dynamiczna konstrukcji stanowi fundamentalny etap projektowania, lecz niezawodność i funkcjonalność obiektów budowlanych zależą bezpośrednio od precyzyjnego określenia parametrów ich drgań swobodnych. Współczesny rozwój techniki charakteryzuje się szybkim rozszerzaniem zakresu zastosowań konstrukcji powłokowych. Wynika to z wymagań praktycznych w różnorodnych gałęziach budownictwa, budowy maszyn, budowy aparatury, lotnictwa oraz techniki raketowej. W tych dziedzinach szczególne znaczenie zyskuje zapobieganie zjawiskom rezonansowym, które mogą prowadzić do uszkodzenia lub zniszczenia zarówno poszczególnych elementów, jak i całych konstrukcji. Rosnące wymagania wobec modeli matematycznych, opisujących na przykład parametry drgań swobodnych konstrukcji powłokowych, wynikają z zastosowania innowacyjnych materiałów kompozytowych, złożonych rozwiązań konstrukcyjnych oraz eksploatacji w warunkach ekstremalnych. Wymusza to stosowanie coraz bardziej precyzyjnych metod badawczych. Klasyczne oraz uściśnione teorie powłok, choć pozwoliły na rozwiązanie wielu zagadnień, często okazują się niewystarczająco dokładne w przypadku

obliczeń konstrukcji grubościennych. Z tego względu zachodzi potrzeba opracowania modeli opartych na przestrzennej teorii sprężystości, które pozwalają na uwzględnienie niejednorodności na grubości oraz anizotropii materiału.

Badaniom drgań swobodnych konstrukcji powłokowych o różnorodnej konfiguracji geometrycznej i strukturalnej w ujęciu przestrzennym poświęcono znaczną liczbę prac naukowych. Przykładowo, w pracy [1], na podstawie dokładnych rozwiązań trójwymiarowego zagadnienia teorii sprężystości wyprowadzono równania niestacjonarnych drgań skrętnych dla trójwarstwowej kołowej powłoki cylindrycznej. Grubości poszczególnych warstw oraz ich właściwości materiałowe mogą być zróżnicowane. Przedstawiono wyniki badań drgań powłoki wzbudzanych obciążeniami zewnętrznymi, działającymi zarówno na jej powierzchnię wewnętrzną, jak i zewnętrzną.

W pracy [2] przeprowadzono analizę drgań swobodnych warstwowych cylindrycznych powłok kompozytowych, wykorzystując podejście ekwiwalentnej warstwy pojedynczej (ESL). Pozwala to – zgodnie z opinią autorów – na dokładne modelowanie matematyczne kompozytów warstwowych z uwzględnieniem odkształceń poprzecznych przy ścinaniu.

W artykule [3] przedstawiono sformułowanie trójwymiarowej uściślonej teorii powłok wyższego rzędu do analizy drgań swobodnych kompozytowych cylindrów. Rozważane są powłoki złożone z warstw ortotropowych. Przy wykorzystaniu zasady Hamiltona wyprowadzono równania ruchu, które rozwiązano metodą Galerki. Otrzymane wyniki numeryczne częstotliwości własnych wykazują dobrą zgodność z dokładnymi rozwiązaniami iteracyjnymi trójwymiarowego zagadnienia teorii sprężystości, dostępnymi w literaturze.

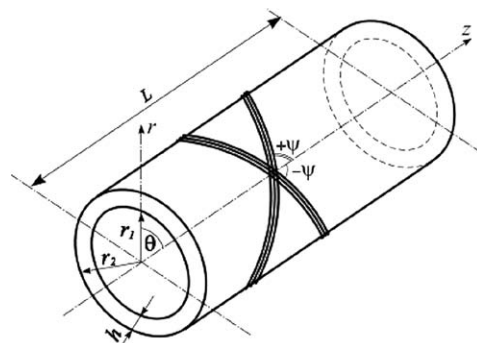
Drgania swobodne konstrukcji składającej się z zamkniętej kołowej powłoki cylindrycznej połączonej z kołową płytą rozważono w pracy [4], wykorzystując podejścia numeryczne i asymptotyczne przy zastosowaniu metody elementów skończonych. Przeprowadzono ocenę optymalnego stosunku grubości płyty do grubości powłoki pod kątem zapewnienia maksymalnych wartości najniższych częstotliwości drgań swobodnych konstrukcji w zależności od jej masy.

Oprócz konstrukcji klasycznych badacze [5] analizują również formy o większym stopniu złożoności. Gofrowane powłoki cylindryczne wykazują specyficzne symetryczne i antysymetryczne postacie drgań. Ich częstotliwości w znacznym stopniu zależą od parametrów gofrowania oraz warunków brzegowych i są inne niż w przypadku gładkich powłok o równoważnej masie. W pracy [6], przy wykorzystaniu pakietu FEMAP, przeprowadzono badania częstotliwości oraz postaci drgań swobodnych powłok grubościennych przy różnych warunkach brzegowych. Przedstawiono analizę porównawczą uzyskanych wyników z danymi eksperymentalnymi.

W czwartym rozdziale monografii [7], w ramach teorii przestrzennej, rozważono osiowosymetryczne drgania powłok cylindrycznych, wykonanych z materiału o jednej płaszczyźnie symetrii właściwości sprężystych. W pracy [8] przedstawiono podejścia do rozwiązywania liniowych i nieliniowych zagadnień mechaniki powłok, opierając się na metodach dyskretno-kontynualnych. Uwzględniono modele klasyczne, uściślone oraz przestrzenne dla powłok izotropowych i ortotropowych, w tym powłok niejednorodnych o zmiennych parametrach geometrycznych i mechanicznych. Z przeprowadzonego przeglądu literatury można wyciągnąć następujące wnioski. Badanie drgań konstrukcji powłokowych stanowi istotne zagadnienie współczesnej nauki. Jednak kwestia wpływu anizotropii materiału – wynikającej z niezgodności głównych kierunków sprężystości z osiami krzywoliniowymi powłoki – na częstotliwości drgań swobodnych w ramach teorii przestrzennej, jest praktycznie nierozpoznana i wymaga dalszej analizy. W niniejszej pracy przedstawiono podejście do rozwiązywania zagadnienia drgań swobodnych grubościennych anizotropowych powłok cylindrycznych (rys. 1), oparte na liniowych zależnościach przestrzennej teorii sprężystości. Jako materiał konstrukcyjny przyjęto jednokierunkowy kompozyt włóknisty (boroplast) o określonej orientacji włókien [9, 10]. Typowym przykładem takiej konfiguracji są powłoki wytwarzane metodą nawijania włókien na mandryl, w wyniku czego powstaje materiał o jednej płaszczyźnie symetrii sprężystej, stycznej do powierzchni środkowej.

Rys. 1.

Grubościenna anizotropowa cylindryczna powłoka



2. Podstawowe równania.

Zasada wariacyjna Hu-Washizu

Zgodnie z zasadą wariacyjną Hu-Washizu [11] równania ruchu, zależności geometryczne oraz odpowiadające im warunki brzegowe mogą być uzyskane z warunku stacjonarności funkcjonału Π_1 , który dla zagadnień dynamicznych określony jest przez całkę:

$$\Pi_1 = \int_{t_1}^{t_2} \left\{ \iiint_V \left[W(e_{ij}) - T(u_i) + \Phi(u_i) - \sigma_{ij} \left[e_{ij} - \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \right] \right] dV + \iint_{S_1} \Psi(u_i) dS - \iint_{S_2} p_i (u_i - \bar{u}_i) dS \right\} dt \quad (1)$$

Tutaj wariują bez dodatkowych warunków przemieszczenia u_r , odkształcenia e_{ij} , naprężenia σ_{ij} , naprężenia p_i na powierzchni S_2 , wywołane przemieszczeniami $\bar{u}_i$. Ponadto w tym funkcjonału $W(e_{ij})$ – potencjał energii deformacji, $T(u_i)$ – energia kinetyczna, $\Phi(u_i)$, $\Psi(u_i)$ – potencjały obciążeń objętościowych i powierzchniowych, u_i – składowe wektora przemieszczeń; średnik przed parametrami i, j oznacza kowariantną pochodną względem współrzędnej z odpowiednim indeksem $i, j = 1, 2, 3$.

Wykorzystując zmodyfikowane podejście przedstawione w pracach [9, 10] oraz stosując zależność (1), wyprowadzono trójwymiarowy układ sześciu jednorodnych równań różniczkowych cząstkowych ruchu liniowej teorii sprężystości. Układ ten zapisano względem sześciu składowych amplitudowych wektora naprężeń $\sigma^T = (\sigma_{rr}, \tau_{r\theta}, \tau_{rz})$ oraz wektora przemieszczeń $u^T = (u_r, u_\theta, u_z)$ w celu wyznaczenia częstotliwości drgań swobodnych anizotropowej grubościennej powłoki cylindrycznej wykonanej z kompozytu:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} &= -\frac{c_{23}+1}{r} \sigma_{rr} - \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{c_{22}}{r^2} u_r + \frac{c_{12}}{r} \frac{\partial u_z}{\partial z} + \frac{c_{26}}{r^2} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + \frac{c_{26}}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial z} + \\ &+ \frac{c_{22}}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \rho \omega^2 u_r, \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} &= c_{13} \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial z} - \frac{1}{r} \tau_{rz} - \frac{c_{12}}{r} \frac{\partial u_r}{\partial z} - c_{11} \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} - \frac{c_{66}}{r^2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial \theta^2} - \frac{c_{12}+c_{66}}{r} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z \partial \theta} + \frac{c_{36}}{r} \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial \theta} - \\ &- \frac{c_{26}}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{2c_{16}}{r} \frac{\partial^2 u_z}{\partial z \partial \theta} - c_{16} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} - \frac{c_{26}}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} + \rho \omega^2 u_z, \\ \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} &= \frac{c_{23}}{r} \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial \theta} - \frac{2}{r} \tau_{r\theta} - \frac{c_{23}}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{c_{12}+c_{66}}{r} \frac{\partial^2 u_z}{\partial z \partial \theta} - c_{66} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} - \frac{c_{23}}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} + \\ &+ c_{36} \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial z} - \frac{c_{26}}{r} \frac{\partial u_r}{\partial z} - c_{16} \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} - \frac{c_{26}}{r^2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial \theta^2} - \frac{2c_{26}}{r} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z \partial \theta} + \rho \omega^2 u_\theta, \\ \frac{\partial u_r}{\partial r} &= c_{33} \sigma_{rr} + \frac{c_{23}}{r} u_r + c_{13} \frac{\partial u_z}{\partial z} + \frac{c_{36}}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + c_{36} \frac{\partial u_\theta}{\partial z} + \frac{c_{23}}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta}, \\ \frac{\partial u_z}{\partial r} &= a_{55} \tau_{rz} + a_{45} \tau_{r\theta} - \frac{\partial u_r}{\partial z}; \quad \frac{\partial u_\theta}{\partial r} = a_{45} \tau_{rz} + a_{44} \tau_{r\theta} - \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{1}{r} u_\theta \end{aligned} \quad (2)$$

Układ równań ruchu (2), wyprowadzony przy zastosowaniu zmodyfikowanej zasady wariacyjnej Hu-Washizu, jest zgodny z wynikami przedstawionymi w pracy [8].

W (2) r – promień cylindra, który nie zależy od współrzędnych z oraz θ ; σ_{rr} , τ_{rz} , $\tau_{r\theta}$ – to składowe tensora naprężeń, natomiast u_z , u_θ , u_r – przemieszczenia powłoki odpowiednio w kierunkach osi z , θ , r ; ω jest częstotliwością swobodnych drgań; ρ – gęstością materiału konstrukcji. Stałe c_{kl} ($k, l = 1, 2, 3, 6$) są charakterystykami materiału powłoki, wyznaczanymi na podstawie stałych sprężystości a_{kl} [12].

Przy wyprowadzaniu układu równań (2) wykorzystano również liniowe zależności geometryczne przedstawione w pracy [9]:

$$\begin{aligned} e_{zz} &= \frac{\partial u_z}{\partial z} & e_{\theta\theta} &= \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{r} u_r & e_{rr} &= \frac{\partial u_r}{\partial r} \\ e_{z\theta} &= \frac{\partial u_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} & e_{rz} &= \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} & e_{r\theta} &= \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{1}{r} u_\theta + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \end{aligned} \quad (3)$$

Tutaj e_{zz} , $e_{\theta\theta}$, e_{rr} oznaczają liniowe odkształcenia względne w kierunkach osi współrzędnych z , θ , r , natomiast $e_{z\theta}$, e_{rz} , $e_{r\theta}$ – względne odkształcenia postaciowe, związane z odpowiednimi powierzchniami współrzędnych i -tej warstwy.

Ponadto przy wyprowadzaniu równań (2) wykorzystano związki fizyczne przedstawione w pracy [9]:

$$\begin{aligned} \sigma_{zz} &= c_{11}e_{zz} + c_{12}e_{\theta\theta} + c_{16}e_{z\theta} - c_{13}\sigma_{rr} \\ \sigma_{\theta\theta} &= c_{12}e_{zz} + c_{22}e_{\theta\theta} + c_{26}e_{z\theta} - c_{23}\sigma_{rr} \\ \tau_{z\theta} &= c_{16}e_{zz} + c_{26}e_{\theta\theta} + c_{66}e_{z\theta} - c_{36}\sigma_{rr} \\ e_{rr} &= c_{13}e_{zz} + c_{23}e_{\theta\theta} + c_{36}e_{z\theta} + c_{33}\sigma_{rr} \\ e_{rz} &= a_{45}\tau_{r\theta} + a_{55}\tau_{rz} & e_{r\theta} &= a_{44}\tau_{r\theta} + a_{45}\tau_{rz} \end{aligned} \quad (4)$$

Rozwiązanie układu równań (2) powinno spełniać warunki brzegowe na powierzchniach walcowych dla $r = r_1$:

$$\sigma_{rr}^0(r_1, z, \theta) = 0 \quad \tau_{rz}^0(r_1, z, \theta) = 0 \quad \tau_{r\theta}^0(r_1, z, \theta) = 0$$

oraz $r = r_2$

$$\sigma_{rr}^n(r_2, z, \theta) = 0 \quad \tau_{rz}^n(r_2, z, \theta) = 0 \quad \tau_{r\theta}^n(r_2, z, \theta) = 0 \quad (5)$$

Warunki brzegowe na krawędziach powłoki dla $z = 0$, $z = L$ (rys. 1) przyjmuje się w postaci:

$$\sigma_{zz} = u_r = u_\theta = 0 \quad (6)$$

3. Podejście do rozwiązania zagadnienia

Do rozwiązania trójwymiarowego układu równań (2), przy uwzględnieniu odpowiednich warunków na powierzchniach

walcowych (5) oraz na krawędziach (6) anizotropowej powłoki cylindrycznej, zastosowano procedurę analityczną metody Bubnowa-Galerkina. Zgodnie z nią funkcje naprężeń oraz przemieszczeń układu (2) rozwinięto w podwójne szeregi trygonometryczne [9, 10] wzdłuż tworzącej walca z . Funkcje te dobrano w taki sposób, aby spełniały warunki brzegowe (6) oraz uwzględniały okresowość rozwiązania w kierunku obwodowym:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr}(r, z, \theta) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} [y_{1,pk}(r) \cos k\theta + y'_{1,mk}(r) \sin k\theta] \sin l_m z \\ \tau_{rz}(r, z, \theta) &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} [y_{2,pk}(r) \cos k\theta + y'_{2,mk}(r) \sin k\theta] \cos l_m z \\ \tau_{r\theta}(r, z, \theta) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} [y_{3,pk}(r) \sin k\theta + y'_{3,mk}(r) \cos k\theta] \sin l_m z \\ u_r(r, z, \theta) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} [y_{4,pk}(r) \cos k\theta + y'_{4,mk}(r) \sin k\theta] \sin l_m z \\ u_z(r, z, \theta) &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} [y_{5,pk}(r) \cos k\theta + y'_{5,mk}(r) \sin k\theta] \cos l_m z \\ u_\theta(r, z, \theta) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} [y_{6,pk}(r) \sin k\theta + y'_{6,mk}(r) \cos k\theta] \sin l_m z \end{aligned} \quad (7)$$

Tutaj $y_{i,pk}$, $y'_{i,mk}$ ($i = 1-6$) to składowe stanu naprężenia i odkształcenia powłoki, rozwinięte w szeregi trygonometryczne Fouriera: σ_{rr} , τ_{rz} , $\tau_{r\theta}$, u_r , u_z , u_θ , natomiast p, m, k – to liczby falowe w szeregach. Parametr $l_m = m\pi/L$, gdzie L – długość tworzącej walca (rys. 1).

Po przeprowadzeniu niezbędnych przekształceń matematycznych oraz separacji zmiennych w równaniach (2), z wykorzystaniem zależności (7), otrzymuje się nieskończony układ zwyczajnych równań różniczkowych w postaci normalnej Cauchy'ego:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{y}}{dr} &= (T(r) - \omega^2 C(r)) \bar{y} & T(r) &= t_{n,l}(r) \\ C(r) &= c_{n,l}(r) & n &= \overline{1, \infty} & l &= \overline{1, \infty} \end{aligned} \quad (8)$$

Gdzie: $\bar{y} = \{y_{1,p}; y_{2,p}; y_{3,p}; y_{4,p}; y_{5,p}; y_{6,p}; y'_{1,m}; y'_{2,m}; y'_{3,m}; y'_{4,m}; y'_{5,m}; y'_{6,m}\}$ to wektor niewiadomych,

$T(r)$ – macierz kwadratowa o zmiennych współczynnikach, zależnych od promienia r , $C(r)$ – macierz charakteryzująca właściwości bezwładnościowe powłoki.

Niezerowe elementy macierzy $T(r)$, oznaczone jako $t_{n,l}(r)$ będące współczynnikami przy niewiadomych układu (8) oraz niezerowe elementy macierzy $C(r)$ mają postać przedstawioną w pracy [10].

Otrzymany w ten sposób jednowymiarowy układ zwyczajnych równań różniczkowych w postaci normalnej Cauchy'ego umożliwia wyznaczenie parametrów drgań swobodnych anizotropowych, grubościennych powłok cylindrycznych w ujęciu przestrzennym.

Rozwiązanie otrzymanego jednowymiarowego zagadnienia przeprowadzono przy zastosowaniu numerycznej metody

dyskretnej ortogonalizacji [8]. Metoda ta została zaadaptowana [9, 10] do rozwiązywania problemów dotyczących stanu naprężenia i odkształcenia, stateczności oraz drgań swobodnych anizotropowych powłok cylindrycznych.

Weryfikacja wiarygodności wyników obliczeń częstotliwości drgań swobodnych anizotropowych powłok cylindrycznych, uzyskanych zgodnie z zaproponowanym podejściem, została przeprowadzona poprzez porównanie ich z wynikami przedstawionymi w pracy [13].

Rozpatrzono powłokę cylindryczną o długości $L = 0,6$ m i promieniu powierzchni wewnętrznej $r_i = 0,26$ m. Struktura warstwowa oraz charakterystyki geometryczne i mechaniczne warstw zostały przedstawione w tabeli 1. Warstwy 2 i 3 stanowią zbrojone kompozyty gumowo-kordowe, ułożone w taki sposób, że główne kierunki sprężystości tych warstw znajdują się pod kątami 65° względem tworzącej cylindra. Wyznaczono minimalną częstotliwość drgań własnych anizotropowego cylindra oraz rozpatrzono przypadek osiowosymetrycznych drgań własnych dla $k = 0$. Porównanie wyników uzyskanych za pomocą podejścia przedstawionego w pracy [13] z wynikami własnymi zaprezentowano w tabeli 2.

Porównanie wyników zestawionych w tabeli 3 wykazuje zadowalającą zgodność częstotliwości drgań własnych, uzyskanych według zaproponowanego podejścia, z danymi przytoczonymi w pracy [13]. Maksymalna rozbieżność między nimi nie przekracza 2%.

4. Realizacja zaproponowanego podejścia

W celu zaprezentowania możliwości zaproponowanego podejścia rozpatrzono zagadnienie drgań swobodnych jedno- oraz czterowarstwowych cylindrycznych powłok anizotropowych. Powłoki te wykonano z kompozytu włóknistego (boroplastu) o następujących charakterystykach mechanicznych: $E_{zz} = 280E_0$; $E_{\theta\theta} = E_{rr} = 31E_0$; $G_{z\theta} = G_{r\theta} = 10,5E_0$; $G_{rz} = 21,2E_0$; $\nu_{\theta z} = 0,25$; $E_0 = 1000$ MPa; $\rho = 2118$ kg/m³. Geometria powłok (rys. 1) jest następująca: $L = 1,2$ m; promień powierzchni środkowej $r = 0,6$ m. Analizę przeprowadzono dla różnych wartości stosunku grubości

powłoki h do promienia powierzchni środkowej r (1/30; 1/20; 1/10; 1/5). Warunki brzegowe na powierzchniach bocznych oraz na krawędziach (końcach) powłok odpowiadają odpowiednio zależnościom (5) oraz (6).

Wyniki obliczeń częstotliwości drgań swobodnych ω (s⁻¹) rozpatrywanych powłok przedstawiono na rysunku 2, który został przedstawiony w układzie współrzędnych: częstotliwość drgań swobodnych (frequency) ω – kąt obrotu głównych kierunków sprężystości materiału (angle) ψ . Kąt obrotu głównych kierunków sprężystości boroplastu ψ zmienia się w zakresie od 0° do 90° . Przeprowadzono porównanie częstotliwości drgań swobodnych uzyskanych przy zastosowaniu zaproponowanego podejścia ARP (anizotropowe rozwiązanie przestrzenne) z wynikami otrzymanymi zgodnie z ortotropowym rozwiązaniem przestrzennym (ORP), w którym tzw. anizotropowe charakterystyki mechaniczne w uogólnionym prawie Hooke'a (4) spełniają warunki $c_{16} = c_{26} = c_{36} = a_{45} = 0$. Rysunek 2a przedstawia wyniki obliczeń dla powłoki o stosunku grubości h do promienia powierzchni środkowej r wynoszącym 1/30, rysunek 2b – dla $h/r = 1/20$, rysunek 2c – dla $h/r = 1/10$ oraz rysunek 2d – dla $h/r = 1/5$.

Analiza uzyskanych minimalnych częstotliwości drgań swobodnych pozwala na sformułowanie następujących wniosków. Minimalne częstotliwości ω zależą od kąta obrotu ψ głównych kierunków sprężystości materiału. Niezależnie od grubości powłoki największe wartości ω dla rozpatrywanych warunków brzegowych występują w zakresie $20^\circ \leq \psi \leq 40^\circ$. Dotyczy to zarówno przypadku uwzględnienia wszystkich składników uogólnionego prawa Hooke'a dla danego rodzaju anizotropii (podejście ARP, krzywa 1), jak i obliczeń w ujęciu ortotropowym (podejście ORP, krzywa 2). Różnica między wartościami maksymalnymi a wartościami ω wyznaczonymi dla $\psi = 0^\circ$ zmienia się, w zależności od grubości powłoki, od 33,5% (dla $h/r = 1/30$) do 48,5% (dla $h/r = 1/5$). Uzyskany efekt można wyjaśnić faktem, że w przedziale $20^\circ \leq \psi \leq 40^\circ$ sztywność konstrukcji – uwzględniająca rozciąganie, ściskanie, ścinanie, zginanie oraz skręcanie – osiąga swoje maksimum.

Należy również zauważyć, że praktycznie w całym zakresie zmian kąta obrotu głównych kierunków sprężystości materiału ψ minimalne częstotliwości drgań swobodnych ω uzyskane zgodnie z podejściem ARP są mniejsze od wartości wyznaczonych według podejścia ORP. Największe rozbieżności występują w przedziale $20^\circ \leq \psi \leq 40^\circ$ i sięgają 9% dla stosunku $h/r = 1/5$. Zjawisko to wynika z uwzględnienia odkształceń postaciowych (skrętnych)

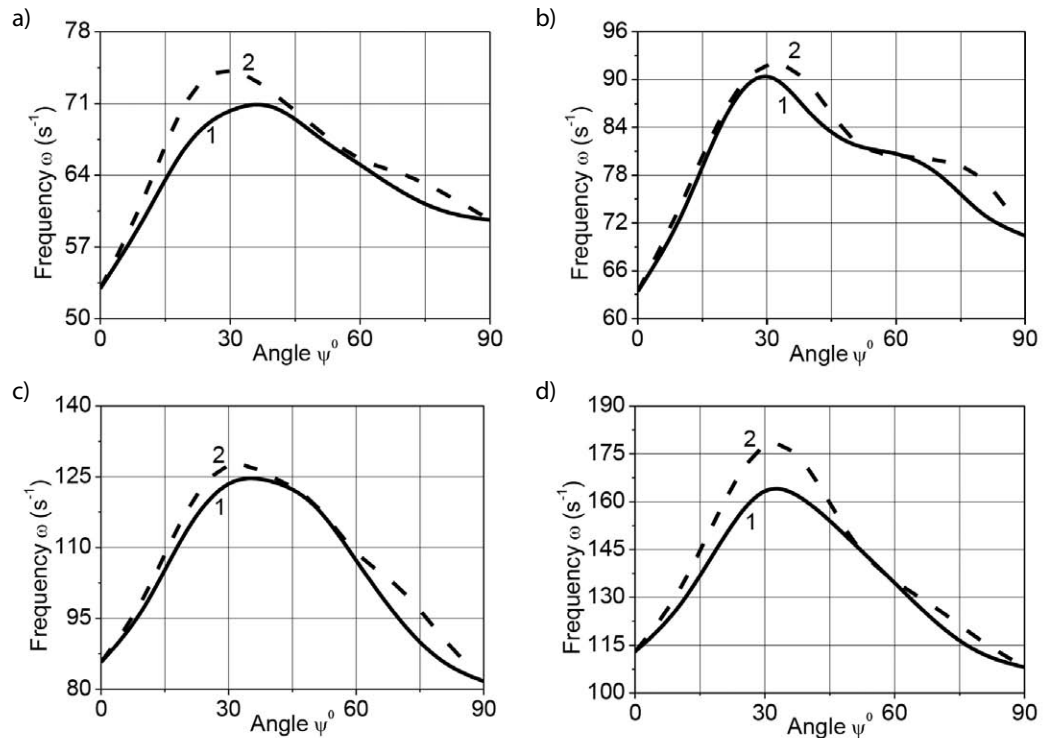
Tabela 1. Charakterystyki geometryczne i mechaniczne anizotropowej powłoki cylindrycznej

N ^o warstwy	$h \cdot 10^3$, m	$E_{11'}$, MPa	$E_{22'}$, MPa	ν_{12}	$G_{12'}$, MPa	$G_{13} = G_{23'}$, MPa	$r \cdot 10^{-3}$, kg/m ³
1	0,75	$5,81 \times 10^2$	$1,18 \times 10^3$	0,42	4,33	3,01	1,00
2	1,40	$1,84 \times 10^3$	7,36	0,47	2,08	1,88	1,54
3	1,40	$1,84 \times 10^3$	7,36	0,47	2,08	1,88	1,54
4	5,86	5,00	5,00	0,49	1,68	1,68	1,00

Tabela 2. Porównanie częstotliwości drgań swobodnych oraz parametrów falowania

Parametr falowania w kierunku obwodowym, k	Zgodnie z [13] $\omega/2\pi$	Według zaproponowanego podejścia $\omega/2\pi$	Δ , %
0	5,208	5,203	0,1
4	0,693	0,681	1,7

Rys. 2. Zmienność minimalnych częstotliwości drgań swobodnych dla różnych stosunków grubości: (a) $h/r = 1/30$, (b) $h/r = 1/20$, (c) $h/r = 1/10$, (d) $h/r = 1/5$. Oznaczenia krzywych: 1 – podejście ARP, 2 – podejście ORP



w powłokach anizotropowych przy zastosowaniu podejścia bezpośredniej redukcji ARP.

5. Podsumowanie

W pracy zaproponowano podejście oparte na wykorzystaniu zmodyfikowanej zasady wariacyjnej Hu-Washizu oraz procedur analitycznych metody Bubnowa-Galerkina do wyznaczania częstotliwości drgań swobodnych grubościennych konstrukcji powłokowych, wykonanych z materiałów anizotropowych. Rozwiązanie sformułowano w oparciu o trójwymiarowe zależności teorii sprężystości, a realizację numeryczną przeprowadzono przy zastosowaniu metody dyskretnej ortogonalizacji. Zaproponowane podejście umożliwia wyznaczanie parametrów drgań powłok anizotropowych przy dowolnych kątach orientacji materiału kompozytowego względem tworzącej cylindra.

Przy wykorzystaniu zaproponowanego podejścia rozwiązano – w ramach liniowej, trójwymiarowej teorii sprężystości – zagadnienia dotyczące drgań swobodnych anizotropowych powłok cylindrycznych o różnej grubości, przy zmiennym kącie orientacji głównych kierunków sprężystości materiału włóknistego. Przeprowadzono szczegółową analizę uzyskanych wyników.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Khudoynazarova D., Gadayev A., Yalgashev B., Torsional vibrations of a three-layer circular cylindrical elastic shell, Conference: International Conference on Actual Problems of Applied Mechanics – APAM-2021, AIP Conference Proceedings 2637(1)2021, art. 030025, <https://doi.org/10.1063/5.0121494>
- [2] Sahu S., Rajana S. K., Free Vibration Analysis of Cylindrical Laminated Composite Shells Using Carrera Unified Formulation, Conference: ASME 2025 International Mechanical Engineering Congress and Exposition – India, December 2025, <https://doi.org/10.1177/10775463261416969>
- [3] Davar A., Kohandani R., Panahi H. M., A New Three-Dimensional Refined Higher-Order Theory for Free Vibration Analysis of Composite Circular Cylindrical Shells. Mechanics of Advanced Composite Structures, November 2019, <https://doi.org/10.22075/macs.2019.14853.1146>
- [4] Filippov S. B., Nesterchuk G. A., Smirnov A. L., Free Vibrations of a Cylindrical Shell Closed with the Cap, In: Altenbach H., Bauer S. M., Belyaev A. K., Indeitsev D. A., Matveenko V. P., Petrov Y. V. (eds) Advances in Solid and Fracture Mechanics, Springer Cham., Advanced Structured Materials 180, 2022, https://doi.org/10.1007/978-3-031-18393-5_5
- [5] Grigorenko O. Y., Borisenko M. Y., Boichuk O. V., Free Vibrations of a Corrugated Closed Cylindrical Shell, Int Appl Mech. 58, 2022, <https://doi.org/10.1007/s10778-022-01133-6>
- [6] Gryhorenko O., Borysenko M., Boychuk O., Pinchuk T., Zastosuvannya chysel'noho analizu do vyznachennya chastot vil'nykh kolyvan' tovsstoinnykh obolonok, [w:] Zbirnyk naukovykh prats' Suchasni problemy prykladnoyi matematyky ta komp'yuternykh nauk, L'viv, 27–28 veresnya 2021, str. 88–91
- [7] Kubenko V. D., Babayev A. E., Bepalova Ye. I. i dr. K., Kolebaniya anizotropnykh obolochek. V kn. Mekhanika kompozitov: V 12 t.: T.9. Dinamika elementov konstruksiy. A.S.K., 1999
- [8] Grigorenko Y. A. M., Vlaykov G. G., Grigorenko A. Y. A., Chislenno-analitycheskoye resheniye zadach mekhaniki obolochek na osnove razlichnykh modeley, Kyiv, Akademperiodika, 2006
- [9] Semenyuk M. P., Trach V. M., Podvornyi A. V., Stress–Strain State of a Thick-Walled Anisotropic Cylindrical Shell. Int Appl Mech. 59, 2023, <https://doi.org/10.1007/s10778-023-01201-5>
- [10] Trach V. M., Podvornyi A. V., Zhukova N. B., Bondarskyi O. G., Free vibrations of layered anisotropic thick-walled cylindrical shells. Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles, Kyiv: KNUBA, 113, 2024, <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.113.250-264>
- [11] Washizu K., Variational Methods in Elasticity and Plasticity, Pergamon Press., 1982
- [12] Lekhnitskii S. G., Theory of Elasticity of an Anisotropic Body. Dagenham: Central Books, 1981
- [13] Bepalova E. I., Boreiko N. P., Determination of the Natural Frequencies of Compound Anisotropic Shell Systems Using Various Deformation Models, Int. Appl. Mech. 55, 2019, <https://doi.org/10.1007/s10778-019-00932-8>

Wpływ twardości stali zbrojeniowej na jej właściwości wytrzymałościowe

Hardness of reinforcing steel and its mechanical properties

dr inż. Olga Szlachetka (ORCID: 0000-0002-1195-3603), dr hab. inż., Marek Henryk Dohojda (ORCID: 0000-0003-0382-805X), Instytut Inżynierii Lądowej, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, mgr inż. Anna Manikowska-Wawrzyniak, mgr inż. Bartłomiej Gogacz – absolwenci Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7930

Streszczenie: Badania twardości stali stanowią jedno z podstawowych narzędzi wykorzystywanych w ocenie jej właściwości mechanicznych, zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i podczas kontroli jakości materiałów konstrukcyjnych. W pracy przedstawiono analizę zależności pomiędzy twardością stali zbrojeniowej klasy B500SP a jej wytrzymałością na rozciąganie oraz granicą plastyczności. Szczególną uwagę poświęcono analizie rozkładu twardości w przekroju poprzecznym pręta stalowego, co umożliwiło ocenę niejednorodności właściwości mechanicznych wynikającej z procesów technologicznych. Wykazano, że najwyższe wartości twardości występują w strefie przypowierzchniowej, natomiast w rdzeniu materiału są one wyraźnie niższe. Różnice te mogą sięgać nawet 50 HV w przypadku prętów o większych średnicach. Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono istnienie wyraźnej korelacji pomiędzy twardością a wytrzymałością na rozciąganie, którą można w przybliżeniu opisać zależnością $R_m \approx 3,3 \cdot HV$. Zależność ta ma jednak charakter orientacyjny i zależy od mikrostruktury, sposobu obróbki materiału oraz średnicy pręta. Uzyskane wyniki mogą znaleźć zastosowanie w praktyce budowlanej, szczególnie w diagnostyce materiałów oraz kontroli jakości stali zbrojeniowej, zwłaszcza w przypadkach, gdy dostępne są próbki o niewielkich wymiarach.

Słowa kluczowe: stal zbrojeniowa, twardość Vickersa, wytrzymałość na rozciąganie, moduł Younga.

Abstract: Hardness testing of steel is one of the fundamental methods used to assess its mechanical properties, particularly under laboratory conditions and in the quality control of structural materials. This study presents an analysis of the relationship between the hardness of B500SP reinforcing steel and its tensile and yield strengths. Special attention is given to the distribution of hardness across the cross-section of a steel bar, enabling evaluation of material heterogeneity resulting from manufacturing processes. It has been shown that the highest hardness values occur in the near-surface zone, whereas significantly lower values are observed in the material's core. These differences can reach up to 50 HV for bars with larger diameters. Based on the analyses, a strong correlation between hardness and tensile strength was identified, which can be approximated by $R_m \approx 3.3 \cdot HV$. However, this relationship is only indicative and depends on the material's microstructure and processing method. The results can be applied in engineering practice, particularly in material diagnostics and quality control of reinforcing steel when only small samples are available.

Keywords: reinforcing steel, Vickers hardness, tensile strength, Young's modulus.

1. Wprowadzenie

Stal zbrojeniowa stanowi jeden z podstawowych materiałów konstrukcyjnych stosowanych w budownictwie, a jej właściwości mechaniczne mają bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo i trwałość konstrukcji żelbetonowych. Wraz z rozwojem technologii produkcji oraz wzrostem wymagań projektowych obserwuje się systematyczne doskonalenie parametrów stali, zarówno pod względem wytrzymałości, jak i jednorodności strukturalnej. Współczesne wyroby hutnicze charakteryzują się wysoką jakością, jednak ich właściwości nadal pozostają silnie uzależnione od technologii wytwarzania oraz historii obróbki materiału. Jednym z kluczowych zagadnień w ocenie jakości stali jest

określenie jej właściwości mechanicznych, takich jak granica plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie, zdolność do odkształceń plastycznych oraz moduł Younga. Parametry te są standardowo wyznaczane w badaniach laboratoryjnych, przede wszystkim w statycznej próbie rozciągania. Badania te są jednak czasochłonne i wymagają specjalistycznego sprzętu, co w warunkach praktycznych ogranicza ich zastosowanie. Z tego względu istotne znaczenie ma poszukiwanie metod pośrednich, umożliwiających szybką ocenę właściwości materiału. Jedną z najczęściej stosowanych metod jest pomiar twardości, polegający na ocenie odporności materiału na lokalne odkształcenia plastyczne. Badanie to cechuje się prostotą wykonania oraz stosunkowo krótkim czasem pomiaru, dzięki czemu znajduje szerokie zastosowanie

zarówno w laboratoriach, jak i w warunkach przemysłowych. Jak wskazano w pracy [1], wyniki pomiarów twardości mogą być wykorzystywane do szacowania innych parametrów mechanicznych, w szczególności wytrzymałości na rozciąganie. Zależność pomiędzy twardością a wytrzymałością na rozciąganie nie ma jednak charakteru jednoznaczności. Na jej przebieg wpływa szereg czynników, takich jak skład chemiczny, mikrostruktura materiału oraz sposób jego obróbki [2]. Istotne znaczenie mają zawartość węgla oraz procesy walcowania i chłodzenia, które decydują o strukturze wewnętrznej stali i rozkładzie naprężeń własnych [3]. Dodatkowym zagadnieniem istotnym z punktu widzenia praktyki budowlanej jest niejednorodność właściwości materiału w przekroju poprzecznym pręta stalowego. Twardość stali zbrojeniowej może zmieniać się w funkcji odległości od powierzchni, co wynika z gradientowego charakteru mikrostruktury kształtowanej podczas obróbki termomechanicznej [4]. Zjawisko to wpływa na lokalne właściwości mechaniczne materiału, a tym samym na jego zachowanie pod obciążeniem oraz bezpieczeństwo konstrukcji. Zależności pomiędzy twardością stali a jej właściwościami wytrzymałościowymi oraz analiza rozkładu twardości w przekroju poprzecznym pręta stanowią istotny problem badawczy, mający znaczenie zarówno poznawcze, jak i praktyczne w inżynierii budowlanej. W związku z powyższym celem artykułu jest przedstawienie oraz ocena przydatności pomiarów twardości jako metody pośredniej w ocenie właściwości mechanicznych stali, a także wskazanie ograniczeń związanych z jej stosowaniem w praktyce inżynierskiej. W artykule wykorzystano wyniki badań laboratoryjnych obejmujących pomiary twardości metodą Vickersa oraz statyczne próby rozciągania prętów żebrowanych o średnicy 32 mm ze stali B500SP oraz o średnicy 12 mm ze stali B500A, B500SP i B500B.

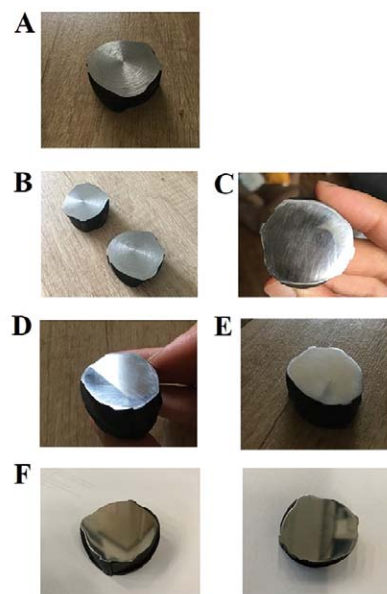
2. Zakres i metody badań

Stal zbrojeniowa klasy B500SP jest powszechnie stosowana w konstrukcjach żelbetowych. Materiał ten charakteryzuje się wysoką granicą plastyczności oraz odpowiednią ciągliwością, co czyni go standardowym wyborem w nowoczesnym budownictwie dopuszczonym do zbrojenia betonu. Do badań wykorzystano trzy pręty żebrowane o średnicy 32 mm, które stanowią typowy element zbrojenia konstrukcji inżynierskich. Próbki do badań twardości przygotowano zgodnie z obowiązującymi procedurami laboratoryjnymi. W pierwszym etapie pręty stalowe poddano cięciu na odcinki przeznaczone do statycznej próby rozciągania oraz do badań twardości. Powierzchnie próbek do badań twardości zostały poddane szlifowaniu i polerowaniu. Kolejne etapy przygotowania powierzchni przedstawiono na rysunku 1.

Badania twardości przeprowadzono metodą Vickersa, polegającą na wciskaniu diamentowego węgelnika w badaną powierzchnię przy zadanym obciążeniu (rys. 2). Wielkość twardości określano na podstawie pomiaru przekątnych odcisku, zgodnie z przyjętą procedurą badawczą według normy ISO

Rys. 1.

Powierzchnia próbek: A – po wstępnym przetoczeniu, B – po szlifowaniu papierem o gradacji 600, C – po szlifowaniu papierem o gradacji 1000, D – po szlifowaniu papierem o gradacji 1500, E – po szlifowaniu papierem o gradacji 2000, F – po polerowaniu pastą polerską



Fot. A. Manikowska-Wawrzyniak

6507 [5] oraz PN-EN ISO 6507-1:2018-05 [6]. Twardość w skali Vickersa obliczana jest ze wzoru:

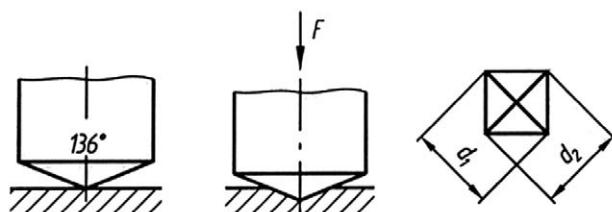
$$HV = 0,1891 \frac{F}{d^2} \quad (1)$$

gdzie:

F – siła obciążająca [N],

d – średnia arytmetyczna z wartości długości dwóch przekątnych odcisku d_1 i d_2 [mm].

Pomiary wykonano w kilku punktach przekroju poprzecznego pręta, co umożliwiło ocenę rozkładu twardości w kierunku promieniowym. Liczbę punktów pomiarowych dobrano w celu zapewnienia istotności statystycznej wyników oraz identyfikacji lokalnych niejednorodności materiału. Różnice w liczbie punktów pomiarowych pomiędzy próbkami wynikały z średnicy pręta oraz geometrii żebrowanej powierzchni prętów, która ograniczała możliwość wykonania pomiarów w niektórych obszarach. Uzupełnieniem badań były statyczne próby rozciągania, przeprowadzone w celu określenia podstawowych parametrów wytrzymałościowych stali, takich jak granica plastyczności oraz wytrzymałość na rozciąganie. Próby rozciągania wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 6892-1:2020-05 [8] przy użyciu maszyny wytrzymałościowej INSTRON 8850, rejestrującej przebieg zależności naprężenie–odkształcenie, a pomiary twardości wykonano na twardościomierzu DigiTestor 930. Badanie twardości zostało przeprowadzone przy obciążeniu 10 kG (98,07 N) i czasie trwania obciążenia wynoszącym 10 s. Zastosowano węgelnik diamentowy posiadający świadectwo kalibracji nr 430013340-B3841.



Rys. 2. Schemat obciążenia w metodzie Vickersa [7]

W celu analizy niejednorodności twardości materiału wykonano dodatkową serię pomiarów na powierzchni przekroju poprzecznego prętów o różnej klasie ciągliwości, obejmujących dwa gatunki stali gorącowalcowanej (B500SP i B500B) oraz jeden gatunek stali zimnowalcowanej (B500A). Badania twardości oraz wytrzymałości na rozciąganie dla tych gatunków stali przeprowadzono na prętach o średnicy 12 mm. Takie podejście umożliwiło ocenę wpływu procesów technologicznych, w szczególności walcowania i chłodzenia, na rozkład właściwości materiałowych, a także pozwoliło określić, czy zależność pomiędzy twardością a wytrzymałością na rozciąganie zmienia się w obrębie tego samego gatunku stali w zależności od średnicy pręta.

3. Wyniki

3.1. Stal B500SP o średnicy 32 mm

Średnia wartość granicy plastyczności badanej stali B500SP o średnicy 32 mm wyniosła 535,8 MPa, natomiast wytrzymałość na rozciąganie osiągnęła wartość około 653 MPa. W trakcie próby rozciągania materiał wykazywał wyraźną zdolność do odkształceń plastycznych. Wyniki pomiarów twardości metodą Vickersa dla trzech próbek wraz z obliczonymi wartościami średnimi oraz odchyleniem standardowym przedstawiono w tabeli 1.

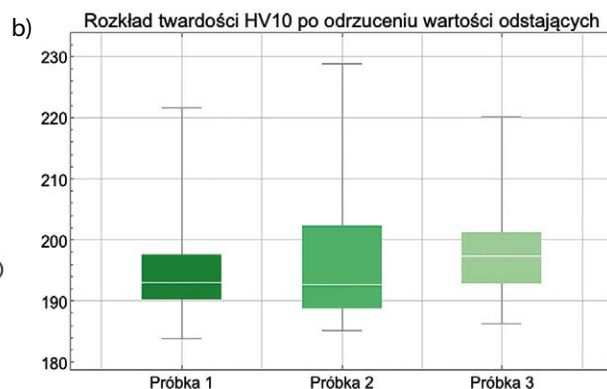
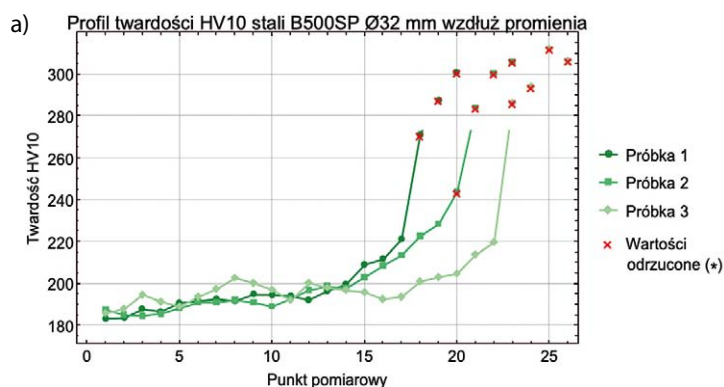
Wyniki zaprezentowano również w formie wykresu liniowego (rys. 3a), który umożliwia analizę zmian twardości w funkcji położenia punktu pomiarowego oraz identyfikację wartości odstających. Stwierdzono, że najwyższe wartości twardości występują w punktach zlokalizowanych w obrębie żeber lub w ich bezpośrednim sąsiedztwie. Wartości te oznaczono jako odstające (*) i wykluczono z dalszej analizy statystycznej (#), ponieważ nie były reprezentatywne dla materiału rdzenia. Ich eliminacja pozwoliła na wyznaczenie bardziej miarodajnych wartości średniej twardości oraz odchylenia standardowego (tab. 1). Odstający charakter tych wyników potwierdzono dodatkowo analizą statystyczną z wykorzystaniem testu Grubbsa przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Wykres pudełkowy (boxplot), opracowany na podstawie danych po odrzuceniu wartości odstających, który

Tabela 1. Twardość HV10 – stal B500SP o średnicy 32 mm

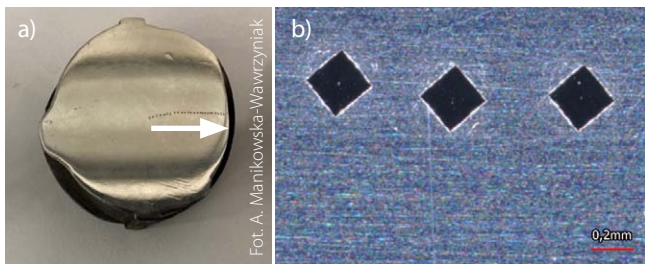
Punkt pomiarowy	Próbka 1	Próbka 2	Próbka 3
1	183,80	188,00	186,20
2	184,10	185,40	188,40
3	188,10	185,10	195,10
4	187,10	186,10	191,80
5	191,20	188,70	189,50
6	192,10	191,40	194,00
7	193,00	191,40	197,90
8	192,10	192,60	203,10
9	195,20	191,40	200,70
10	195,10	189,50	197,50
11	194,30	193,20	192,30
12	192,70	197,30	200,80
13	196,90	199,10	198,40
14	200,10	198,20	197,30
15	209,50	203,50	196,20
16	212,10	209,00	193,00
17	221,70	214,00	194,10
18	271,60*	223,10	201,40
19	288,10*	228,90	203,50
20	301,30*	244,30*	205,20
21		284,50*	214,20
22		300,80*	220,20
23		306,40*	286,70*
24			294,50*
25			312,50*
26			306,90*
Średnia twardość Vickersa ze wszystkich pomiarów	209,51	213,81	213,90
Odchylenie standardowe ze wszystkich pomiarów	34,11	36,04	37,68
Średnia twardość Vickersa #	195,83	197,68	198,22
Odchylenie standardowe #	10,08	12,69	7,96

*najwyższe wartości nieuwzględnione przy obliczaniu parametrów analizy statystycznej oznaczonych #

umożliwia ocenę rozkładu twardości oraz wizualizację mediany i rozstępu międzykwartylowego przedstawiono na rysunku 3b. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na powierzchni



Rys. 3. Twardość HV10 stali B500SP o średnicy 32 mm: a) profil twardości w funkcji odległości od środka pręta z zaznaczeniem wartości odstających (*), b) rozkład twardości (wykres pudełkowy) dla danych po odrzuceniu wartości odstających, z uwzględnieniem mediany i rozstępu międzykwartylowego



Rys. 4. Próbkę nr 2 po przeprowadzonych pomiarach twardości; białą strzałką zaznaczono kierunek pomiarów, na rysunku widoczne są odciski wglębnika (a), zdjęcia mikroskopowe odcisków wykonanych podczas badania twardości (b)

próbki przedstawia rysunek 4a, natomiast przykładowe odciski wglębnika uzyskane podczas badania twardości dokumentuje rysunek 4b.

3.2. Stale B500A, B500B, B500SP o średnicy 12 mm

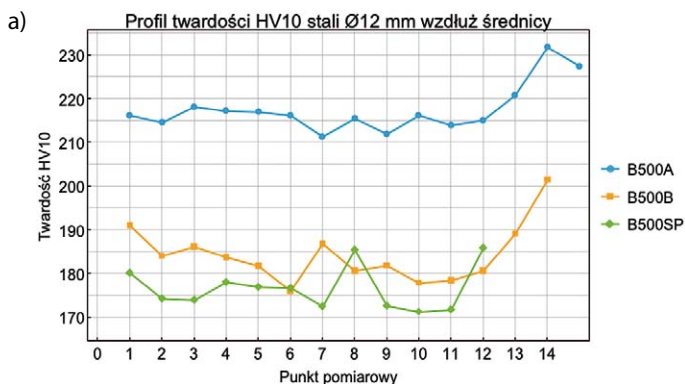
Wartości wytrzymałości na rozciąganie dla prętów o średnicy 12 mm wyniosły odpowiednio: 662 MPa dla stali B500A, 619 MPa dla stali B500B oraz 618 MPa dla stali B500SP.

W przypadku prętów o średnicy 12 mm nie zaobserwowano istotnych zmian twardości w kierunku promieniowym. Pomiarzy wykonano wzdłuż całej średnicy próbki. Wyniki przedstawiono na rysunku 5. Profil twardości wzdłuż średnicy dla trzech gatunków stali przedstawia rysunek 5a, natomiast rozkład wartości twardości w postaci wykresu pudełkowego prezentuje rysunek 5b. Analiza statystyczna wyników, przeprowadzona z wykorzystaniem testu Grubbsa przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$, nie wykazała obecności wartości odstających. Wszystkie wyniki mieszczą się w zakresie dopuszczalnej zmienności, co znajduje odzwierciedlenie w niewielkich wartościach odchylenia standardowego.

4. Analiza wyników badań twardości i właściwości wytrzymałościowych stali zbrojeniowej

4.1. Wytrzymałość na rozciąganie i granica plastyczności – stal B500SP o średnicy 32 mm

Uzyskane wartości parametrów wytrzymałościowych mieszczą się w zakresie charakterystycznym dla stali B500SP, co potwierdza



Rys. 5. Twardość HV10 stali B500A, B500B, B500SP o średnicy 12 mm: a) profil twardości wzdłuż średnicy, b) rozkład wartości twardości w ujęciu statystycznym (wykres pudełkowy)

poprawność procesu technologicznego oraz jakość badanego materiału.

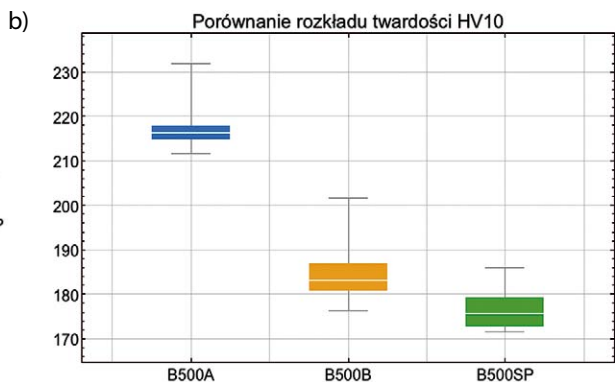
4.2 Twardość – stal B500SP o średnicy 32 mm

Uzyskane wyniki badań wykazały, że twardość stali B500SP mieści się w przedziale od około 184 do 307 HV10 i zależy od odległości od osi pręta. Najwyższe wartości odnotowano w strefie przypowierzchniowej (ok. 240–307 HV10), natomiast w rdzeniu wartości wynosiły około 184–190 HV10. Gradient twardości w przekroju poprzecznym pręta wynika z charakteru procesu obróbki termomechanicznej (TMT). W trakcie walcowania na gorąco powierzchnia pręta ulega intensywnemu chłodzeniu, co prowadzi do powstania warstwy martenzytycznej o podwyższonej twardości. Jednocześnie rdzeń materiału chłodzi się wolniej, zachowując bardziej plastyczną strukturę ferrytyczno-perlityczną [9]. Różnice w szybkości chłodzenia oraz odkształceniu plastycznym powodują powstanie niejednorodnej mikrostruktury, co przekłada się na obserwowany rozkład twardości. Rozkład twardości był zbliżony dla wszystkich próbek – wartości najniższe występowały w rdzeniu, a następnie rosły w kierunku powierzchni, osiągając maksima w końcowych punktach pomiarowych. Wzrost twardości względem rdzenia wynosił około 60%.

4.3. Zależność pomiędzy twardością a wytrzymałością – stal B500SP o średnicy 32 mm

Zależność pomiędzy twardością a wytrzymałością na rozciąganie wynika z powiązania obu parametrów z oporem materiału na odkształcenie plastyczne. W stalach konstrukcyjnych zależą one od gęstości dyslokacji, struktury fazowej oraz stopnia umocnienia materiału.

Na podstawie średniej twardości rdzenia (197 HV) oraz zmierzonej wytrzymałości na rozciąganie (653 MPa) wyznaczono współczynnik proporcjonalności między tymi wielkościami. Otrzymana wartość jest zgodna z empirycznymi zależnościami dla stali konstrukcyjnych [10,11]. Należy podkreślić, że zależność ta ma charakter przybliżony i powinna być stosowana jedynie do celów porównawczych, a nie jako zamiennik próby rozciągania. Zależności tego typu mają zawsze charakter empiryczny i wymagają kalibracji dla konkretnego rodzaju stali, co wynika z wpływu mikrostruktury oraz historii obróbki materiału [12].



4.4. Porównanie rozkładu twardości i wytrzymałości – stal o średnicy 12 mm

W przypadku prętów o średnicy 12 mm nie zaobserwowano istotnych zmian twardości w kierunku promieniowym. Różnice pomiędzy rdzeniem a powierzchnią nie przekraczały 10%, co wskazuje na bardziej jednorodny rozkład właściwości mechanicznych. Najwyższą twardość wykazywała stal B500A, natomiast najmniejsze zróżnicowanie wartości odnotowano dla stali B500SP. Jednocześnie różnice w wytrzymałości na rozciąganie pomiędzy analizowanymi gatunkami stali są niewielkie i nie wykazują jednoznacznej korelacji z rozkładem twardości. Porównanie prętów o średnicy 32 mm i 12 mm wskazuje, że średnica pręta ma istotny wpływ na jednorodność właściwości materiału. W większych przekrojach trudniej uzyskać równomierne chłodzenie i odkształcenie, co prowadzi do powstania wyraźnego gradientu twardości. Warstwa przypowierzchniowa ulega większemu odkształceniu plastycznemu oraz szybszemu chłodzeniu, co powoduje jej wzmocnienie, natomiast rdzeń zachowuje niższą twardość i większą plastyczność.

4.5. Wpływ składu chemicznego

Wpływ składu chemicznego (w tym zawartości węgla, manganu i krzemu) na twardość badanych stali okazał się drugorzędny w stosunku do wpływu procesów technologicznych. Pomimo różnic w zawartości pierwiastków stopowych nie zaobserwowano jednoznacznej korelacji z uzyskanymi wartościami twardości, co wskazuje na dominującą rolę procesu walcowania i chłodzenia [2].

4.6. Wnioski praktyczne

Istotnym wnioskiem wynikającym z badań jest niejednorodność właściwości materiału w przekroju poprzecznym prętów o większej średnicy. Wyższa twardość warstwy przypowierzchniowej oraz niższa w rdzeniu wskazują na silny wpływ procesów technologicznych. Z punktu widzenia praktyki inżynierskiej oznacza to, że właściwości mechaniczne prętów zbrojeniowych nie są jednorodne w całym przekroju, co może mieć znaczenie przy analizie pracy elementów konstrukcyjnych, zwłaszcza w warunkach obciążeń zmiennych i zmęczeniowych [13].

5. Podsumowanie

Wyniki badań wykazały, że twardość stali B500SP zależy od średnicy pręta oraz warunków technologicznych jego wytwarzania. Pręty o średnicy 32 mm charakteryzowały się wyższą średnią twardością (ok. 212 HV10) w porównaniu do prętów o średnicy 12 mm (ok. 177 HV10).

W prętach o większej średnicy stwierdzono wyraźny gradient twardości w przekroju poprzecznym – najwyższe wartości występowały w warstwie przypowierzchniowej, natomiast najniższe w rdzeniu. Zjawisko to wynika z nierównomiernych warunków odkształcenia i chłodzenia podczas procesu walcowania. W prętach o średnicy 12 mm nie zaobserwowano istotnych

zmian twardości w kierunku promieniowym, co wskazuje na bardziej jednorodny rozkład właściwości.

Analiza wykazała istnienie przybliżonej zależności pomiędzy twardością a wytrzymałością na rozciąganie, którą można opisać relacją $R_m \approx 3,3 \cdot HV10$. Zależność ta może być wykorzystywana do orientacyjnego szacowania właściwości materiału, jednak błąd oszacowania może sięgać około 10% i zależy od lokalnej niejednorodności strukturalnej.

Nie stwierdzono jednoznacznej korelacji pomiędzy składem chemicznym a uzyskaną twardością, co wskazuje na dominujący wpływ procesów technologicznych na właściwości badanych stali.

Ze względu na lokalny charakter pomiaru twardości pojedynczy wynik nie jest reprezentatywny dla całego przekroju pręta. Właściwa interpretacja wyników wymaga uwzględnienia przestrzennego rozkładu właściwości materiału.

Podsumowując, pomiar twardości może stanowić użyteczne narzędzie wspomagające ocenę właściwości stali zbrojeniowej, jednak jego zastosowanie powinno być uzupełnione innymi metodami badawczymi, szczególnie w analizie elementów o istotnym znaczeniu konstrukcyjnym.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Manikowska-Wawrzyniak A., Rozpoznanie korelacji parametrów wytrzymałościowych stali konstrukcyjnej, praca magisterska, SGGW, Warszawa, 2022
- [2] Gogacz B., Rozkład twardości stali zbrojeniowej w kierunku promieniowym przekroju poprzecznego pręta, praca magisterska, SGGW, Warszawa, 2023
- [3] Noronha D. J., Sharma S., Prabhu Parkala R., Shankar G., Kumar N., Doddapaneni S. Deep rolling techniques: A comprehensive review of process parameters and impacts on the material properties of commercial steels, *Metals* 14(6)2024, str. 667
- [4] Shaabani A., Jamaati R., Hosseini pour S. J., Effect of thermomechanical processing on anisotropic behavior of low-carbon steel, *Results in Engineering* 25, 2025, art. 103848
- [5] ISO 6507 Materiały metaliczne – Badanie twardości według Vickersa. Część 1: Metody badawcze
- [6] PN-EN ISO 6507-1:2018-05: Metale – Pomiar twardości sposobem Vickersa. Część 1: Metoda badania
- [7] Podręczny Poradnik Mechanika. Wpływ domieszek na właściwości stali, strona internetowa: https://softdis.pl/index.php?option=com_content&view=article&id=3053:wpsyw-domieszek-na-wsapciwopci-stali&catid=258&Itemid=51 (dostęp 15.03.2026)
- [8] PN-EN ISO 6892-1:2020-05: Metale – Próba rozciągania – Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej
- [9] Fente T. E., Tsegaw A. A., Abebe A. T., Admasu B. T., Investigating the quality of ethiopian steel reinforcing bars through comprehensive analysis, *Heliyon* 10(10)2024
- [10] PN-H-04357:1993: Stal i stalowo – Tablice porównawcze twardości określonej sposobem Rockwella, Vickersa, Brinella, Shore'a i wytrzymałości na rozciąganie
- [11] Caprili S., Mattei F., Mazzatura I., Ferrari F., Gammino M., Mariscotti M., Mori M., Piscini A. Evaluation of mechanical characteristics of steel bars by non-destructive Vickers micro-hardness tests, *Procedia Structural Integrity* 44, 2023, str. 886–893
- [12] Gosowski B., Organek P., Redeki M., Relationship between the strength parameters and Brinell hardness of historical steels and its application in design, preprint available at <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5678533>
- [13] Ruiz-Menéndez G., Andrade C., Carro-Sevillano G., Peña C., Adeva P., Medina J., Fernández R., Identification of the failure mode of corroding steel rebars in a viaduct in service through hardness measurements, *Results in Engineering* 13, 2022, art. 100331

Budownictwo drewniane – problemy i wyzwania

Wood-based building – problems and challenges

mgr inż. Urszula Kotwica (ORCID: 0009-0000-8344-5352), Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, mgr inż. Ewa Kotwica (ORCID: 0009-0001-4351-4912), Centrum Drewna i Konstrukcji Drewnianych, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, dr inż. Paweł Sulik (ORCID: 0000-0001-8050-8194), Instytut Techniki Budowlanej

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7932

Streszczenie: Specyfika polskich przepisów i związane z nimi dodatkowe wymagania stawiane wyrobom z drewna, konieczność impregnacji, pomijanie detali na etapie wykonywania dokumentacji projektowej, brak dostatecznej wiedzy wśród projektantów i wykonawców oraz brak rzetelnego nadzoru – wszystko to powoduje, że budownictwo drewniane w Polsce wciąż nie jest tak powszechne i rozwinięte jak w pozostałych krajach Europy. W artykule poruszono wybrane problemy i bariery dotyczące konstrukcji z drewna w Polsce z obszaru legislacji oraz normalizacji. Wskazano przykładowe błędy i braki w projektach, skutkujące niewłaściwym wykonywaniem konstrukcji drewnianych.

Słowa kluczowe: budownictwo drewniane, problemy budownictwa drewnianego, bezpieczeństwo pożarowe drewna, przepisy dotyczące drewna.

Abstract: The specific nature of Polish regulations and the associated additional requirements imposed on timber products, the need for impregnation, the omission of details during the preparation of design documentation, a lack of sufficient knowledge among designers and contractors, and the absence of reliable supervision – all these factors mean wooden construction in Poland is still not as widespread or developed as in other European countries. This article addresses selected issues and barriers concerning timber structures in Poland in the areas of legislation and standardization. It highlights examples of errors and omissions in designs that result in the improper construction of timber structures.

Keywords: timber construction, issues in timber construction, fire safety of timber, timber regulations.

1. Wprowadzenie

Drewno jako materiał konstrukcyjny wpisuje się w europejską politykę zrównoważonego rozwoju, ograniczającą nadmierną emisję CO₂ [1]. Nie tylko jest materiałem pochodzenia organicznego i odnawialnym, ale też aktywnie uczestniczy podczas swojego cyklu życia w redukcji śladu węglowego [2–4]. Należy jednocześnie podkreślić, że przy odpowiedniej gospodarce leśnej bieżąca eksploatacja lasów nie wpływa negatywnie na całość zasobów [5].

Polska ma duży potencjał jako producent drewna. Zgodnie z danymi Głównego Urzędu Statystycznego [6] w 2023 roku powierzchnia lasów obejmowała 9,2949 mln ha, co stanowi 29,6% powierzchni kraju. Mimo tego w Polsce wciąż udział rozwiązań z zastosowaniem konstrukcji drewnianych w całym budownictwie jest niewielki, choć na świecie powstają coraz śmielsze inwestycje realizowane przy zastosowaniu drewna i materiałów konstrukcyjnych na jego bazie. Drewno w Polsce utożsamiane jest najczęściej jako materiał do budowy domków letniskowych i na konstrukcję więźby dachowej, coraz częściej też do realizacji domów prefabrykowanych czy konstrukcji z wiązarów łączonych na płytki kolczaste. Tymczasem w innych krajach Europy i świata realizowane są z zastosowaniem konstrukcji drewnianych

coraz wyższe, kilkunastokondygnacyjne obiekty czy hale o rozpiętościach dochodzących do 100 m [7].

Niniejszy artykuł przedstawia zestawienie wybranych obszarów z zakresu legislacji, projektowania i wykonawstwa, stanowiących bariery dla budownictwa drewnianego. Celem publikacji jest wskazanie kwestii wymagających reakcji i zmian, które umożliwią oraz ułatwią rozwój ekologicznego budownictwa drewnianego w Polsce. Opisane aspekty często wymagają działań na niewielką skalę, w tym zmian przyzwyczajzeń uczestników procesu budowlanego, by można było również w Polsce bezpiecznie realizować obiekty, powstające już od lat w Europie i na świecie. Wybór przedstawionych problemów wynika z doświadczeń zawodowych autorów zarówno w obszarze kwestii barier legislacyjnych i udziału w pracach z nimi powiązanych, jak i z wniosków na podstawie wykonywanych badań laboratoryjnych, ekspertyz czy opinii oraz napraw istniejących obiektów o konstrukcji drewnianej.

2. Legislacja krajowa

Jednym z wymogów znacząco ograniczających możliwość stosowania drewna w konstrukcjach, zwłaszcza w budynkach o większej kubaturze, stanowiących obiekty użyteczności publicznej lub wielorodzinne, jest kwestia konieczności

spełnienia wymogu nierozprzestrzeniania ognia (NRO), odnoszona do wyrobów konstrukcyjnych, a nie – wyłącznie do przegród.

W rozporządzeniu w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [8], nierozprzestrzenianie ognia zostało powiązane z klasami reakcji na ogień w Załączniku nr 3. Zgodnie z punktem 2.1 elementom nierozprzestrzeniającym ognia odpowiadają elementy wykonane z materiałów w klasie reakcji na ogień A lub B (odpowiednio elementy niepalne i trudno palne). Tymczasem zapisy odpowiednich norm zharmonizowanych dotyczących materiałów z drewna wskazują:

- zgodnie z normą PN-EN 14081-1 [9], pkt 5.3, elementy z drewna konstrukcyjnego sortowanego metodą wizualną i maszynową, o grubości elementu minimum 22 mm i gęstości średniej minimum 350 kg/m³ bez potrzeby wykonywania dodatkowych badań klasyfikowane są do klasy reakcji na ogień D-s2, d0 (z wyłączeniem podłóg);
- w PN-EN 15497 [10] dotyczącej konstrukcyjnego drewna łączonego na złącza klinowe, w pkt 5.5 wskazano, że elementy z drewna konstrukcyjnego sortowanego metodą wizualną i maszynową, o grubości elementu minimum 22 mm i gęstości średniej minimum 350 kg/m³ bez potrzeby wykonywania dodatkowych badań klasyfikowane są do klasy reakcji na ogień D-s2, d0 (z wyłączeniem podłóg) – analogicznie jak w przypadku drewna konstrukcyjnego litego;
- w normie PN-EN 14080 [11] w rozdziale 5.8 w Tablicy 11 wskazano, że wyroby z drewna klejonego warstwowo zgodnie z ww. normą o minimalnej grubości całkowitej 40 mm i minimalnej średniej gęstości 380 kg/m³, bez potrzeby wykonywania dodatkowych badań klasyfikowane są do klasy reakcji na ogień D-s2, d0 (z wyłączeniem podłóg).

Wskazane wyżej wyroby klasyfikowane są bez badań jako klasa reakcji na ogień D-s2, d0, gdzie D odpowiada elementom łatwopalnym. W praktyce oznacza to, że możliwość zastosowania drewna jako materiału konstrukcyjnego poszczególnych elementów obiektu, dla których wymagane jest spełnienie wymagania NRO, wiąże się z koniecznością podniesienia klasy reakcji na ogień do klasy B – najczęściej przy pomocy impregnatów. Wymóg ten jest specyficznym polskim przepisem, niewystępującym w większości krajów Europy, znacznie ograniczającym obszar stosowania drewna lub nakładającym obowiązek zastosowania na ekologicznym drewnie chemicznych substancji, nie zawsze obojętnych środowiskowo.

Dodatkowo brak przepisów wykonawczych oraz brak procedur kontrolnych sprowadza wymagania podnoszenia klasy reakcji na ogień drewna tylko do kontroli dostarczonych dokumentów, co nie jest równoznaczne z rzeczywistym zapewnieniem bezpieczeństwa pożarowego. Brakuje powszechnej świadomości wśród uczestników procesu budowlanego, że faktyczne podniesienie klasy reakcji na ogień wymaga zapewnienia wysycenia impregnatem w ilości wskazanej w dokumentacji producenta (np. 200–350 g/m²

w zależności od preparatu), a podnoszenie tej klasy przez producenta drewnianych elementów konstrukcyjnych wiąże się z koniecznością spełnienia wszystkich wymagań Systemu 1 oceny i weryfikacji stałości właściwości użytkowych. Przykładowe minimalne zużycie impregnatu w przeliczeniu na 1 m² powierzchni, wymagane przez producenta w celu zapewnienia podniesienia klasy reakcji na ogień trzech losowo wybranych preparatów, oznaczonych „A”, „B” i „C” przedstawiono w tabeli 1. Należy podkreślić, że przed użyciem danego środka konieczne jest sprawdzenie zakresu stosowania dopuszczonego przez producenta, jak również formy aplikacji i deklarowanych osiąganych właściwości. Nie wszystkie impregnaty przeznaczone są do stosowania w warunkach zewnętrznych, tak samo jak preparat przeznaczony do zabezpieczenia drewna litego niekoniecznie musi obejmować swoim zakresem dopuszczenia również konstrukcyjne wyroby na bazie drewna, np. drewno klejone krzyżowo. Dodatkowo, jak w przypadku preparatu „C”, osiągana klasa reakcji na ogień zależy od sposobu przeprowadzenia impregnacji. Klasę reakcji na ogień B, pozwalającą na zaklasyfikowanie zaimpregnowanego drewna jako materiału nierozprzestrzeniającego ognia, można osiągnąć metodą powierzchniową w postaci kąpeli. Metoda powierzchniowa poprzez malowanie pozwala na osiągnięcie klasy reakcji na ogień C, odpowiadającej materiałom słabo rozprzestrzeniającym ogień [8]. W praktyce oznacza to, że takiego środka impregnującego nie da się zastosować w warunkach placu budowy, a jedynie na etapie produkcji, jeśli celem ma być możliwość zadeklarowania NRO. Problematyczne będzie też więc zabezpieczenie miejsc docinanych na placu budowy, nawet, jeżeli wcześniej cała konstrukcja została w warunkach produkcyjnych zaimpregnowana metodą kąpeli do klasy reakcji na ogień B. Środków podnoszących klasę reakcji na ogień jest dostępnych o wiele więcej, natomiast już wybrane, przywołane w tabeli 1 przykłady wskazują na złożoność zagadnienia, jakim jest spełnienie wymogu zapewnienia stopnia nierozprzestrzeniania ognia zgodnego z polskimi przepisami Rozporządzenia [8].

Tabela 1. Przykładowe minimalne zużycie oraz osiągana klasa reakcji na ogień w zależności od rodzaju preparatu oraz metody aplikacji

Impregnat	Metoda aplikacji	Wymagane minimalne zużycie	Klasa reakcji na ogień
A	metoda powierzchniowa, smarowanie, natrysk lub kąpiel	200 g/m ²	B-s2, d0
B	maszyna szczotkowa, natrysk, powlekarka przepływowa, smarowanie, natrysk	350 g/m ²	B-s1, d0
C	metoda powierzchniowa (smarowanie)	200 g/m ²	C-s2, d0
C	metoda powierzchniowa (kąpiel)	200 g/m ²	B-s2, d0

Podstawą do projektowania konstrukcji drewnianych jest Eurokod 5 PN-EN-1995-1-1:2010 + A1:2014 [12]. Podane datowanie dotyczy normy aktualnej, choć w świetle zapisów ustawy o normalizacji, stanowiska Polskiego Komitetu Normalizacyjnego oraz zapisów Załącznika 1 Rozporządzenia [8] – jej stosowanie w Polsce nie jest jednoznaczne. Teoretycznie w przypadku norm niedatowanych, obowiązującym dokumentem jest najnowsza jego wersja – ale zgodnie z przepisami pod tablicą w Załączniku 1 do Rozporządzenia [8]: „W przypadku gdy przywołano niedatowaną Polską Normę, należy stosować najnowszą normę opublikowaną w języku polskim”. W sytuacji, gdy najnowszą normą nie została przetłumaczona i opublikowana w języku polskim, występuje rozbieżność między stanem prawnym zawartym w wymienionym rozporządzeniu [8] a zasadami wiedzy technicznej, wymagającymi stosowania najnowszego stanu tej wiedzy. Istotą prac normalizacyjnych jest dostarczanie użytkownikom najbardziej aktualnych rozwiązań i wytycznych, co oznacza, że dokumenty takie ulegają zmianom zgodnie z aktualnym stanem wiedzy technicznej. Realną barierą w przypadku korzystania z norm, w tym norm dotyczących budownictwa drewnianego, jest brak tłumaczenia zmian czy nowszych wersji danej normy na język polski. Na przykład zmiana do Eurokodu 5 [12] z 2014 roku pomimo upływu czasu dostępna jest tylko w języku angielskim. W efekcie wielu projektantów decyduje się na używanie starszej wersji, opublikowanej po polsku, mimo iż wersja ta nie uwzględnia aktualnych zmian.

3. Dostępność materiału

Pomimo tego, że Polska posiada istotny potencjał zasobów leśnych i produkuje drewno, w tym również do zastosowań konstrukcyjnych, na polskim rynku brak jest wystarczającej dostępności poprawnie wysortowanego drewna, umożliwiającego bezpieczne zastosowanie konstrukcyjne.

Przemysł tartaczny na terenie kraju jest bardzo rozdrobniony, większość tartaków stanowią niewielkie, często rodzinne, przedsiębiorstwa, w których sortowanie drewna odbywa się wyłącznie metodą wizualną, a drewno niejednokrotnie jest sortowane przy wilgotności przekraczającej 20%, co nie jest właściwe. Duże zakłady, posiadające zaawansowane linie produkcyjne i możliwość sortowania maszynowego oraz suszarnie, występują nielicznie. W zestawieniu z faktem, że na rynku wciąż znajduje się zbyt dużo drewna oferowanego jako konstrukcyjne, choć nie posiadającego stałych i niezmiennych właściwości użytkowych powoduje to, że profesjonalne firmy produkujące i budujące drewniane obiekty prefabrykowane bazują na materiale z importu.

Należy podkreślić, że od poprawnego wysortowania i przypisania do właściwej klasy wytrzymałościowej zależy, czy elementy wbudowane w konstrukcję będą w stanie pracować pod projektowanymi obciążeniami, spełniając wymagania

stanu granicznego nośności i użytkowania. Drewno o nieustalonych lub nieposiadających gwarancji stałości właściwościach użytkowych – nie gwarantuje poprawnej pracy po wbudowaniu.

4. Projektowanie i wykonawstwo

Jak w każdym rodzaju budownictwa również w budownictwie drewnianym można znaleźć liczne przykłady niewłaściwie wykonanych obiektów. Obserwowane błędy nie wynikają jednak z samego faktu zastosowania konstrukcji drewnianej, a z zastosowania niewłaściwego materiału i sposobu postępowania z nim oraz z błędnych i/lub niekompletnych prac projektowych. Drewno jako materiał konstrukcyjny daje ogromne możliwości zarówno przy projektowaniu domów jednorodzinnych czy niewielkich kubatury obiektów, jak i przy tworzeniu śmiałych architektonicznie form o znacznym stopniu skomplikowania. Praca z drewnem wymaga zachowania zaostrzonego reżimu jakości, m.in. z uwagi na wrażliwość na wilgoć, co jest gwarantem odpowiedniej trwałości rozwiązań i zapewnieniem bezproblemowej eksploatacji przez lata.

Budownictwo drewniane wymaga kompleksowego projektowania, rozwiązań uwzględniających właściwości materiału, w tym uwzględnienia charakteru pracy i sposobu przyłożenia obciążeń. Właściwy kompletny projekt powinien podlegać realizacji bez wprowadzania zmian. Ważnym aspektem, często marginalizowanym lub pomijanym w dokumentacji projektowej, jest projektowanie połączeń, które są równie istotne dla bezpiecznej pracy całego ustroju, co samo odpowiednie dobranie przekrojów elementów. Niestety powszechną praktyką jest dostarczanie na plac budowy niekompletnej dokumentacji projektowej, nie zawierającej rozwiązań węzłów, stężeń i/lub szczególnych miejsc styków/kolizji z innymi elementami, jak np. instalacja. Wykonawca wobec braku dokładnych wytycznych próbuje sam rozwiązywać takie problemy, niezależnie od tego, czy posiada odpowiednią wiedzę techniczną, doświadczenie w projektowaniu konstrukcji drewnianych oraz uprawnienia do projektowania. Jednocześnie pomijany jest obowiązek zgłoszenia inwestorowi braków w dokumentacji projektowej. Rozwiązania projektowe zobowiązany jest dostarczyć projektant, który posiada stosowne obliczenia statyczne pozwalające na zaprojektowanie węzłów oraz innych kluczowych miejsc konstrukcji tak, by przeniosły występujące siły wewnętrzne.

Braki w dokumentacji projektowej często skutkują tym, że połączenia elementów wykonywane są na etapie realizacji bez wcześniejszego uwzględnienia w projekcie liczby i rozmieszczenia łączników. Tymczasem w przypadku konstrukcji drewnianych nie tylko właściwa, wynikająca z obliczeń liczba łączników, ale i ich rozłożenie – ma duże znaczenie. Brak zachowania minimalnych odległości między łącznikami oraz od krawędzi i/lub końca elementu może powodować

pękanie drewna, a tym samym osłabienie nośności. Podobnie negatywny wpływ na nośność przekroju będzie miało jego osłabienie otworami pod łączniki. Z kolei w przypadku wtórnego projektowania połączenia – czyli dopiero na etapie realizacji, może okazać się, że przy wcześniej dobranych przekrojach elementów prawidłowe rozmieszczenie łączników będzie niemożliwe z uwagi na brak miejsca.

Sytuacje takie jak przytoczone powyżej powodują, że na etapie wykonywania obiektu powstają rozwiązania zastępcze, niezgodne z zasadami wiedzy technicznej oraz uwarunkowaniami normowymi, a dodatkowo, jak wskazano wyżej – nie każdy wykonawca posiada uprawnienia projektowe oraz wiedzę o wytyczeniu konstrukcji, która jest niezbędna do uwzględnienia przy kształtowaniu połączenia.

Projekt obiektu o konstrukcji drewnianej wymaga globalnej analizy ustroju i jego sztywności przestrzennej, a nie tylko samego doboru parametrów przekrojów z uwagi na stan graniczny nośności oraz stan graniczny użytkowania. Wspomniane połączenia i konieczność zaprojektowania liczby oraz rozłożenia łączników to tylko jeden z często pomijanych w dokumentacji aspektów. Kolejnym jest kompleksowa koordynacja między branżami i zaprojektowanie instalacji – zarówno pod względem przejść przez przegrody, jak i potencjalnych kolizji. Najlepiej zaprojektowany obiekt nie będzie spełniał swoich funkcji, jeżeli w wyniku niewiedzy zostanie naruszona integralność konstrukcji nośnej (np. poprzez podcięcie czy usunięcie fragmentu konstrukcji) lub szczelność przegrody i w efekcie straci ona swoje właściwości.

5. Nadzór

W powiązaniu z przytoczonymi powyżej przykładami należy wskazać kolejny z problemów dotyczący konstrukcji drewnianych. Teoretycznie, wskazane przypadki niepoprawnie wyprodukowanego materiału, braków projektowych czy błędnie wykonanych połączeń/detali powinny zostać zauważone w trakcie odbioru kolejnego etapu robót budowlanych lub podczas odbioru końcowego. Osoby odpowiedzialne powinny zobowiązać projektanta do uzupełnienia braków w dokumentacji, a wykonawcę do usunięcia niepoprawnych rozwiązań i naprawienia błędów przed ostatecznym zakończeniem budowy.

W praktyce niestety często brakuje rzetelnego nadzoru, a nawet jeśli ten nadzór jest zapewniony, osoby nadzorujące nie posiadają dostatecznej wiedzy technicznej w zakresie konstrukcji drewnianych, w efekcie czego niektóre błędy zostają przeoczone. Ponieważ zmiana Ustawy Prawo budowlane [13] z grudnia 2025 rozszerzeniem artykułu 57 ust 3 sprowadziła kontrolną rolę Nadzoru budowlanego nad projektem do sprawdzenia oświadczenia i kopii dokumentów, o których mowa w art. 34 ust. 3d – wykrycie błędów dokumentacji projektowej przez przedstawicieli NB jest mało prawdopodobne.

6. Podsumowanie

Rozwój budownictwa drewnianego w Polsce, jak wskazano na wstępie, wymaga podjęcia określonych działań i zniesienia barier z obszaru legislacji krajowej. Polskie przepisy nakładają na elementy konstrukcji wykonane z drewna dodatkowe wymagania dotyczące nierozprzestrzeniania ognia, co powoduje ograniczenie możliwości stosowania tego materiału. Omówione przykłady problemów wskazują na potrzebę edukacji zarówno projektantów i wykonawców, jak i osób odpowiedzialnych za nadzór nad właściwym wykonaniem konstrukcji. Konieczne jest wypracowanie optymalnych ram rozwoju dla budownictwa drewnianego w Polsce, między innymi stworzenie wytycznych do stworzenia przepisów dedykowanych budownictwu drewnianemu, zasad kształcenia kadr na poziomie średnim i wyższym oraz rozwijanie i upowszechnianie aktualnych zasad wiedzy technicznej. Jedną z odpowiedzi na wskazane zapotrzebowanie jest utworzenie Centrum Drewna i Konstrukcji Drewnianych przy SGGW w Warszawie, którego celem jest działalność na rzecz rozwoju budownictwa drewnianego w Polsce.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Csiha C. M., Insights into EU Sustainability Regulations Promoting Wood as a Climate-Smart Construction Material, *Applied Sciences* 16(4)2026, art. 1902, doi:10.3390/app16041902
- [2] Pierzchalski M., Wood and Wood-Based Products in Construction: Carbon Sequestration, Emissions and End-of-Life Scenarios. *Drewno, Prace naukowe. Doniesienia. Komunikaty* 69(217)2026, art. 00078, doi:10.53502/wood-209238
- [3] Chivulescu S., Radu G. R., Pitar D., Leca S., Dobre A. C., Badea O., Timber as a low-carbon material strategy: A systematic review of substitution effects and mitigation potential in building systems, *Annals of Forest Research* 69(1)2026, str. 45–60, doi:10.15287/afr.2026.4342
- [4] Ruini A., Sporchia S., Le Rose A., Gioia C., Patrizi N., Bastianoni S., Timber Buildings and the Environmental Benefits of Cascading: LCA Application to Circular Practices in the Wood Value Chain. *ISOCARP World Planning Congress, 60th Diamond Anniversary, 8–12 October 2024, Siena, Italy*
- [5] https://www.lasy.gov.pl/pl/informacje/publikacje/do-poczytania/lasy-panstwowe-w-liczbach-1/lasy-w-liczbach_pl_online.pdf (dostęp 04.2026)
- [6] <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/rolnictwo-lesnictwo/lesnictwo/lesnictwo-w-2023-roku,3,5.html> (dostęp 03.2026)
- [7] Ilgin H. E., Karjalainen M., Tallest Timber Buildings: Main Architectural and Structural Design Considerations, 2022, doi: 10.5772/intechopen.105072
- [8] Rozporządzenie w sprawie warunków technicznych Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (z późn. zm.)
- [9] PN-EN 14081-1+A1:2011: Konstrukcje drewniane. Drewno konstrukcyjne o przekroju prostokątnym sortowane wytrzymałościowo. Część 1: Wymagania ogólne
- [10] PN-EN 15497:2014 PN-EN 15497:2014-06: Konstrukcyjne drewno lite łączone na złącza klinowe – Wymagania jakościowe i minimalne wymagania produkcyjne
- [11] PN-EN 14080:2013 PN-EN 14080:2013-06: Konstrukcje drewniane. Drewno klejone warstwowo i konstrukcyjne sklejone drewno lite. Wymagania
- [12] PN-EN-1995-1-1:2010+A1 2014: Eurokod 5 Projektowanie konstrukcji drewnianych. Część 1-1: Postanowienia ogólne. Reguły ogólne i reguły dotyczące budynków
- [13] Ustawa prawo budowlane z dnia 7 lipca 1994 r., z późn. zm.

Katastrofy budowlane obiektów zabytkowych w zabudowie śródmiejskiej – przyczyny, mechanizmy i wnioski projektowe

Construction disasters of historic buildings in the city center – causes, mechanisms and design conclusions

dr inż. arch. Paulina Filas-Zajac (ORCID: 0000-0003-2239-1906), Instytut Inżynierii Lądowej, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7933

Streszczenie: Obiekty zabytkowe zlokalizowane w zwartej zabudowie śródmiejskiej stanowią szczególną kategorię konstrukcji, charakteryzującą się podwyższonym ryzykiem wystąpienia awarii oraz katastrof budowlanych. Wynika to przede wszystkim z ich zaawansowanego wieku technicznego, postępującej degradacji materiałowych, licznych przebudów i adaptacji, a także z oddziaływań związanych z intensywną urbanizacją otoczenia oraz prowadzenia prac budowlanych w bezpośrednim sąsiedztwie istniejącej zabudowy. W artykule przedstawiono analizę głównych przyczyn oraz mechanizmów prowadzących do katastrof budowlanych w obiektach zabytkowych, ze szczególnym uwzględnieniem konstrukcji murowanych. Zidentyfikowano kluczową rolę ingerencji budowlanych, zmian warunków gruntowo-wodnych oraz błędów diagnostycznych i projektowych jako czynników inicjujących proces utraty nośności i stateczności konstrukcji. Zwrócono również uwagę na znaczenie oddziaływań pomiędzy sąsiednimi budynkami oraz na wpływ zaniedbań w zakresie utrzymania obiektów. Na podstawie przeprowadzonej analizy mechanizmów zniszczenia sformułowano wnioski o charakterze projektowym i diagnostycznym, istotne z punktu widzenia praktyki inżynierskiej oraz działań związanych z ochroną substancji zabytkowej.

Słowa kluczowe: katastrofa budowlana, obiekt zabytkowy, diagnostyka konstrukcji, zabudowa śródmiejska, utrata stateczności.

Abstract: Historic buildings located within dense inner-city urban fabric constitute a specific category of structures characterized by an increased risk of structural failures and building collapses. This results primarily from their advanced technical age, progressive material degradation, numerous reconstructions and functional adaptations, as well as the impacts associated with intensive urban development and construction works carried out in the immediate vicinity of existing buildings. This paper presents an analysis of the principal causes and mechanisms leading to building failures in historic structures, with particular emphasis on masonry buildings. The study identifies construction interventions, changes in ground and groundwater conditions, and diagnostic and design errors as key factors initiating the process of loss of load-bearing capacity and structural stability. Attention is also given to the interactions between adjacent buildings in dense urban environments and to the effects of insufficient maintenance of historic structures. Based on the conducted analysis of failure mechanisms, a set of design and diagnostic recommendations has been formulated, relevant from the perspective of engineering practice as well as the protection and conservation of historic building fabric.

Keywords: structural failure, historic building, structural assessment, dense urban fabric, loss of stability.

1. Wprowadzenie

Pojęcie zabudowy śródmiejskiej, wprowadzone w tytule artykułu, wyznacza zakres rozważań oraz determinuje problematykę występowania katastrof budowlanych w obiektach zabytkowych. W obowiązującym systemie prawnym funkcjonuje definicja zabudowy śródmiejskiej zawarta w przepisach techniczno-budowlanych. Zgodnie z §3. Rozporządzenia w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, przez zabudowę śródmiejską rozumie się: „intensywną zabudowę zlokalizowaną na obszarze śródmieścia, określonym w miejscowym planie zagospodarowania przestrzennego,

a w przypadku jego braku – w studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego gminy” [1].

Wprowadzenie tej definicji do przepisów prawa budowlanego miało charakter instrumentu planistycznego, umożliwiającego kształtowanie intensywnej zabudowy w obszarach centralnych miast przy jednoczesnym dostosowaniu wymagań formalnych do specyfiki istniejącej struktury urbanistycznej. Należy jednak zauważyć, że proces intensyfikacji zabudowy w historycznych strukturach miejskich, szczególnie na obszarach o wysokim stopniu zagęszczenia, może prowadzić do wzrostu oddziaływań konstrukcyjnych pomiędzy sąsiadującymi budynkami. Zjawisko to stanowi jeden z czynników sprzyjających powstawaniu

uszkodzeń konstrukcyjnych, a w skrajnych przypadkach może prowadzić do wystąpienia awarii lub katastrof budowlanych. Zabudowa zlokalizowana w ścisłych centrach miast polskich, a także wielu miast europejskich, charakteryzuje się znacznym zróżnicowaniem chronologicznym. Obiekty te powstawały w szerokim przedziale czasowym – od średniowiecza po wiek XXI. W strukturze wielu kamienic zachowały się relikty wcześniejszych faz budowlanych, takie jak fragmenty murów gotyckich w partiach piwnic lub kondygnacji parterowych, a także elementy zabudowy renesansowej. Jednocześnie znacząca część istniejącej zabudowy śródmiejskiej pochodzi z okresu XIX i początku XX wieku. Tak duże zróżnicowanie czasowe powoduje, że w obrębie sąsiadujących działek często występują obiekty wzniesione w odmiennych technologiach konstrukcyjnych, opartych głównie na murach ceglanych oraz stropach drewnianych lub stalowo-ceramicznych [2]. Różnorodność ta stanowi istotne wyzwanie w procesie adaptacji istniejących obiektów oraz realizacji zabudowy plombowej [3].

Współcześnie budynki te podlegają intensywnym procesom adaptacyjnym, modernizacyjnym oraz przebudowom, wynikającym zarówno z konieczności dostosowania ich do współczesnych funkcji użytkowych, jak i z wymogów obowiązujących przepisów prawa budowlanego. Jednocześnie aktualny stan techniczny wielu z nich często odbiega od pierwotnych założeń projektowych. Wynika to z długotrwałej degradacji materiałowej, oddziaływania czynników środowiskowych oraz licznych, często nieudokumentowanych ingerencji konstrukcyjnych prowadzonych na przestrzeni lat.

Katastrofy budowlane w obiektach zabytkowych stanowią szczególny przypadek zdarzeń budowlanych [4]. Obejmują one nie tylko poważne konsekwencje związane z zagrożeniem życia i zdrowia ludzi, lecz również prowadzą do nieodwracalnej utraty substancji zabytkowej. Zgodnie z definicją zawartą w ustawie – Prawo budowlane (art. 73 ust. 1), katastrofa budowlana oznacza: „niezamierzone, gwałtowne zniszczenie obiektu budowlanego lub jego części, a także konstrukcyjnych elementów rusztowań, elementów urządzeń formujących, ścianek szczelnych i obudowy wykopów” [5].

Celem niniejszego artykułu jest identyfikacja głównych przyczyn katastrof budowlanych w obiektach zabytkowych zlokalizowanych w zwartej zabudowie śródmiejskiej. Problematyka ta była przedmiotem licznych opracowań naukowych, jednak obiekty o wieku powyżej 50 lat, funkcjonujące w warunkach ścisłej zabudowy śródmiejskiej stanowią szczególną grupę, która dotychczas nie była analizowana w sposób kompleksowy w tym kontekście. W związku z tym w artykule podjęto próbę analizy mechanizmów prowadzących do występowania katastrof budowlanych w tego typu strukturach urbanistycznych oraz sformułowano wnioski istotne z punktu widzenia diagnostyki technicznej i praktyki projektowej.

W pracy zastosowano analizę literatury przedmiotu dotyczącej przyczyn występowania katastrof budowlanych oraz analizę stanu prawnego, obejmującą zarówno przepisy Prawa budowlanego, jak i aktualne normy projektowe. Uzupełnienie badań

stanowiły wybrane, ze względu na ich reprezentatywny charakter, przykłady katastrof budowlanych oraz dane statystyczne ich dotyczące zawarte w raportach GUNB z lat 2019–2024 [6].

2. Specyfika konstrukcyjna obiektów zabytkowych w zabudowie śródmiejskiej

Obiekty zabytkowe zlokalizowane w zwartej zabudowie śródmiejskiej charakteryzują się specyficznymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi, istotnie różniącymi się od współczesnych systemów budowlanych [7]. Wynika to zarówno z odmiennych technologii wznoszenia, jak i z obowiązujących w przeszłości norm oraz zasad projektowania konstrukcji. Do najczęściej spotykanych tradycyjnych rozwiązań konstrukcyjnych należą:

- posadowienie na fundamentach betonowych, kamiennych lub ceramicznych,
- stropy w postaci sklepień ceglanych płyty ceglane oparte na belkach stalowych, stropów drewnianych oraz stropów typu Kleina, Moniera i Ackermana,
- układ konstrukcyjny oparty na ścianach murowanych o zróżnicowanej grubości, wykonanych z cegły ceramicznej pełnej na zaprawie wapiennej, często wykończonych tynkiem wapiennym, a także ściany z kamienia naturalnego np. wapienia,
- nadproża nad otworami w postaci nadproży płaskich typu Klein, belek stalowych walcowanych lub łukowych sklepień ceglanych wykonanych na zaprawie wapiennej.

Z punktu widzenia pracy statycznej konstrukcji opartej na aktualnych normach projektowania konstrukcji murowych m.in. według PN-EN 1996 czy PN-EN 1990 obiekty te wykazują również szereg cech wpływających na ich podatność na uszkodzenia, w szczególności:

- brak elementów szkieletowych umożliwiających przestrzenną redystrybucję sił,
- ograniczoną zdolność konstrukcji do przenoszenia obciążeń mimośrodowych,
- wysoką wrażliwość na nierównomierne osiadania podłoża gruntowego,
- ograniczoną ciągliwość konstrukcji murowanych,
- brak stężeń poziomych w postaci wieńców na poziomach poszczególnych kondygnacjach,
- fundamenty o często nieudokumentowanej nośności,
- brak izolacji poziomej w strefie fundamentowej.

Istotnym problemem w analizie technicznej obiektów zabytkowych jest również brak pełnej dokumentacji projektowej i wykonawczej w zakresie wymaganym we współczesnej praktyce budowlanej w porównaniu z nowo wzniesionymi obiektami. Należy zauważyć, że dopiero ustawa z 1961 r. [8] w sposób bardziej kompleksowy regulowała zagadnienia związane z procesem inwestycyjnym, projektowaniem oraz wykonawstwem robót budowlanych. Wcześniejsze regulacje, w tym pierwsze polskie Prawo budowlane z 1928 r. [9], zawierały wprawdzie rozbudowaną część dotyczącą przepisów techniczno-budowlanych, jednak nie precyzowały szczegółowo zakresu wymaganej dokumentacji budowlanej.

W konsekwencji w przypadku wielu obiektów zabytkowych występuje brak dokumentacji technicznej lub jej znaczna niekompletność, co istotnie utrudnia prawidłową identyfikację schematu statycznego konstrukcji oraz ocenę jej aktualnego stanu technicznego. Problem ten pogłębiają liczne przebudowy i adaptacje wykonywane w przeszłości, często bez pełnej kontroli projektowej, a także stosowanie technologii i materiałów budowlanych odmiennych od współcześnie stosowanych rozwiązań.

3. Główne przyczyny katastrof budowlanych

Zgodnie z danymi statystycznymi katastrofy budowlane są najczęściej wynikiem trzech podstawowych grup czynników: niewłaściwego utrzymania obiektu budowlanego, zdarzeń losowych oraz błędów powstałych w trakcie prowadzenia prac budowlanych. Szczegółowy podział tych przyczyn przedstawiono w tabeli 1.

Z ogólnopolskich danych GUNB z lat 2019-2024 roku wynika, że w skali całego kraju istotny udział w strukturze przyczyn katastrof budowlanych mają zdarzenia losowe, następnie błędy w utrzymywaniu obiektu budowlanego, a w mniejszym stopniu prace budowlane [6]. Należy jednak podkreślić, że dane te nie wyodrębniają specyfiki zabudowy śródmiejskiej ani obiektów zabytkowych, w których znaczącą rolę mogą odgrywać również czynniki związane z ingerencjami budowlanymi, pracami ziemnymi oraz błędami diagnostycznymi.

Problematyka przyczyn katastrof budowlanych w obiektach zabytkowych została szeroko opisana w literaturze specjalistycznej, w której wskazuje się liczne czynniki techniczne, organizacyjne oraz środowiskowe wpływające na bezpieczeństwo konstrukcji. Na podstawie przeprowadzonych analiz wyodrębniono jednak te czynniki, które w szczególny sposób dotyczą obiektów zlokalizowanych w zwartej zabudowie śródmiejskiej, a następnie zilustrowano je wybranymi przykładami zdarzeń o charakterze awaryjnym i katastrofalnym.

3.1. Uwarunkowania geotechniczne i zmiany warunków gruntowo-wodnych

Zmiany warunków gruntowo-wodnych stanowią jeden z istotnych czynników ryzyka dla istniejącej zabudowy, zwłaszcza

w obszarach zwartej zabudowy śródmiejskiej. W takich warunkach nawet niewielkie zaburzenie równowagi geotechnicznej podłoża mogą prowadzić do powstania uszkodzeń konstrukcji budynku. Do najczęściej występujących przyczyn należą w szczególności:

- obniżenie lub podwyższenie poziomu wód gruntowych,
- złożone uwarunkowania geotechniczne i geologiczne podłoża,
- prowadzenie głębokich wykopów w bezpośrednim sąsiedztwie istniejących obiektów.

Przykładem takiego zjawiska jest katastrofa budowlana, do której doszło w styczniu 2025 roku przy ul. Bernardyńskiej 10 w Lublinie (rys. 1). Jej bezpośrednią przyczyną według wykonanej ekspertyzy była awaria sieci wodociągowej, która doprowadziła do gromadzenia się wody w piwnicach budynku oraz podmycia fundamentów. W konsekwencji pojawiły się liczne pęknięcia w ścianach konstrukcyjnych, a następnie doszło do zawalenia się południowej ściany obiektu. Z uwagi na zagrożenie bezpieczeństwa budynek został ostatecznie rozebrany.

Analiza tego zdarzenia wskazuje również na znaczenie lokalnych uwarunkowań geologicznych. Znaczna część obszaru Lublina położona jest na podłożu lessowym [10], które w warunkach nasycenia wodą może ulegać gwałtownej redukcji objętości, określanej jako osiadanie zapadowe. Zjawisko to polega na utracie stabilności struktury gruntu w wyniku przerwania wiązań międzyziarnowych, co prowadzi



Rys. 1. Katastrofa budowlana ul. Bernardyńska 10 w Lublinie

Fot. Iwona Burdaczewska

Tabela 1. Przyczyny katastrof budowlanych na podstawie danych GUNB z 2019-2024 r.

Zdarzenia losowe	Błędy podczas utrzymania obiektu	Błędy podczas wykonywania robót budowlanych w obiekcie lub jego sąsiedztwie
- Silne wiatry - Pożary - Intensywne opady atmosferyczne - Powodzie - inne	- Zły stan techniczny - Brak kontroli obiektu budowlanego - Brak wykonywania przez zarządcę nieruchomości/właściciela obowiązków wynikających z opracowań technicznych - Brak wykonywania przez zarządcę nieruchomości/właściciela obowiązków wynikających z działań organów nadzoru budowlanego - Brak wykonywania przez zarządcę nieruchomości/właściciela obowiązków wynikających z kontroli obiektu budowlanego - Inne okoliczności.	- Nieprzestrzeganie technologii wykonania - Naruszenie obowiązków przez uczestników procesu budowlanego - Prowadzenie robót w warunkach samowoli budowlanej

do obniżenia spójności gruntu oraz znacznego zmniejszenia wartości kąta oporu na ścinanie [11].

Warto również podkreślić, że kamienica przy ul. Bernardyńskiej 10 nie była ujęta w Wykazie nieruchomości obiektów zabytkowych ujętych w Gminnej Ewidencji Zabytków (GEZ) Miasta Lublin, ale znajdowała się w bezpośrednim sąsiedztwie budynków nr 8 i 12, które figurują w tej ewidencji. Z uwagi na charakter przyczyn katastrofy oraz warunki geotechniczne podłoża należy przyjąć, że potencjalne oddziaływanie tego typu zjawisk może dotyczyć również obiektów sąsiednich, posadowionych na tym samym podłożu lessowym.

Ważnym czynnikiem komplikującym prowadzenie prac budowlanych w historycznej tkance miejskiej jest możliwość występowania nieudokumentowanych relikwów archeologicznych lub pozostałości dawnych struktur budowlanych w podłożu. Efektem tych procesów zachodzących w podłożu jest nierównomierne osiadanie fundamentów, co prowadzi do powstawania naprężeń rozciągających w murach, które charakteryzują się niewielką wytrzymałością na rozciąganie. W konsekwencji dochodzi do pojawienia się licznych rys i pęknięć w elementach konstrukcyjnych budynku, takich jak ściany nośne, stropy czy nadproża.

Uzupełnienie powyższych rozważań stanowi interesujący przykład awarii jaka wystąpiła w kamienicy zlokalizowanej przy ul. Kajki 2 w Lidzbarku Warmińskim (rys. 2). Zjawisko to przejawiało się licznymi spękaniem ścian konstrukcyjnych, zarówno wewnętrznych, jak i zewnętrznych. Zaobserwowane nieciągłości układały się w jednej płaszczyźnie, co wskazywało na postępujący proces rozdzielenia bryły budynku na dwie części. W toku przeprowadzonej ekspertyzy technicznej ujawniono złożoną problematykę związaną z posadowieniem obiektu. Ustalono, że wschodnia część budynku została posadowiona w obrębie dawnego koryta rzeki, przy czym sposób jej fundamentowania nie był wcześniej udokumentowany. Badania wykazały obecność fundamentów kamiennych opartych na relikwach średniowiecznej budowli. Istniejący mur, stanowiący pozostałość tej struktury, wyznaczał dokładnie płaszczyznę powstałego

rozłamu konstrukcji. Ponadto ustalono, że budynek wzniesiono w miejscu dawnej głównej bramy wjazdowej do zamku, co dodatkowo potwierdza złożony kontekst historyczno-przestrzenny analizowanego obiektu [12].

Przedstawiony przypadek, choć zaliczany jest do awarii budowlanych i nie wpisuje się w definicję katastrofy budowlanej zgodnie z art.73 Prawa budowlanego, ale zwraca uwagę na istotny problem. Jedną z przyczyn mogących prowadzić do katastrof budowlanych w obiektach zabytkowych zlokalizowanych w zabudowie śródmiejskiej są bowiem nie w pełni rozpoznane uwarunkowania historyczne oraz konstrukcyjne związane z posadowieniem budynków. W szczególności dotyczy to sytuacji, w których współczesna zabudowa powstawała na relikwach wcześniejszych struktur architektonicznych lub w obrębie dawnych układów hydrograficznych, co może prowadzić do nierównomiernych osiadań oraz powstawania nieciągłości konstrukcyjnych.

3.2. Ingerencje budowlane i błędy eksploatacyjne

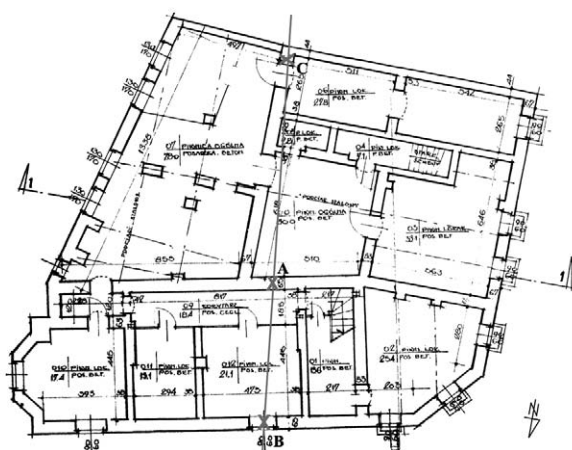
Istotną grupę przyczyn katastrof budowlanych w obiektach zabytkowych stanowią niekontrolowane ingerencje budowlane, nieprawidłowa eksploatacja budynków oraz zły stan techniczny obiektów [13]. W wielu przypadkach wynikają one z braku odpowiedniej wiedzy technicznej lub niewystarczającej świadomości właścicieli i zarządców nieruchomości w zakresie specyfiki konstrukcji zabytkowych [14].

Do szczególnie niebezpiecznych działań należą przede wszystkim:

- usuwanie ścian nośnych,
- wykonywanie nowych otworów w ścianach konstrukcyjnych,
- zmiana schematu statycznego budynku,
- prowadzenie robót budowlanych bez zastosowania odpowiednich zabezpieczeń tymczasowych.

Ingerencje tego rodzaju prowadzą do redystrybucji sił w konstrukcji i mogą powodować przeciążenie pozostałych elementów nośnych. Dodatkowym problemem jest prowadzenie prac budowlanych bez wymaganej dokumentacji projektowej, ekspertyz technicznych czy programów konserwatorskich. W wielu przypadkach roboty wykonywane są przez podmioty nieposiadające odpowiednich kwalifikacji zawodowych lub bez wymaganych pozwoleń administracyjnych. Zjawisko to jest szczególnie widoczne w przypadku obiektów o mniejszej randze historycznej, które często nie są postrzegane jako elementy dziedzictwa kulturowego. Niska świadomość właścicieli i zarządców nieruchomości prowadzi do podejmowania prac remontowych bez wcześniejszego rozpoznania stanu technicznego budynku. W konsekwencji pojawiają się samowolne ingerencje w elementy konstrukcyjne, które mogą zaburzać równowagę statyczną całego obiektu.

Szczególną kategorię ingerencji stanowią remonty obejmujące części wspólne budynku, takie jak ściany nośne, stropy, instalacje wspólne, elewacje, dachy czy klatki schodowe. Prace tego typu wymagają uzyskania zgody wspólnoty mieszkaniowej lub zarządcy nieruchomości oraz powinny podlegać odpowiedniej kontroli technicznej. Brak reakcji administratora



Rys. 2. Lokalizacja przebiegu głównego pęknięcia budynku przy ul. Kajki 2 w Lidzbarku Warmińskim, rzut piwnicy (opracowanie Biuro Projektów Budownictwa Komunalnego w Olsztynie)

w sytuacji prowadzenia robót mogących stwarzać zagrożenie dla konstrukcji budynku może prowadzić do jego współodpowiedzialności za skutki takich działań [15].

3.3. Błędy diagnostyczne i projektowe

Kolejną istotną grupę przyczyn katastrof budowlanych są błędy diagnostyczne oraz nieprawidłowe założenia projektowe. Problemy te wynikają najczęściej z niewłaściwej oceny stanu technicznego istniejącego obiektu lub niedostatecznego rozpoznania jego rzeczywistej struktury konstrukcyjnej.

Do najczęściej występujących błędów należą:

- niedoszacowania stopnia degradacji konstrukcji,
- przyjęcie nieprawidłowego schematu statycznego budynku,
- nieuwzględnienia rzeczywistego stanu zniszczenia materiałów konstrukcyjnych w tym: degradacji cegły i zapraw murarskich, korozji biologicznej elementów drewnianych oraz procesów korozyjnych w elementach stalowych.

Skutki takich błędów ujawniają się najczęściej w sytuacji zwiększenia obciążeń konstrukcji, na przykład w wyniku nadbudowy istniejącego obiektu, realizacji zabudowy plombowej w jego bezpośrednim sąsiedztwie lub prowadzenia prac podziemnych. W takich przypadkach obniżona nośność elementów konstrukcyjnych może prowadzić do przekroczenia stanów granicznych nośności i użyteczności.

Przykładem takiego zdarzenia jest katastrofa budowlana kamienicy przy ul. 1 Maja 23 w Łodzi, do której doszło we wrześniu 2024 roku (rys. 3). W wyniku uszkodzenia konstrukcji zawaleniu uległy ściany oraz stropy budynku, a następnie doszło do całkowitego zawalenia kamienicy. Zdarzenie to było związane z pracami prowadzonymi przy użyciu tarczy TBM (Tunnel Boring Machine) „Katarzyna”, która realizowała drążenie tunelu kolejowego pod miastem.

W przypadku prowadzenia prac podziemnych w silnie zurbanizowanych obszarach jednym z kluczowych elementów procesu inwestycyjnego jest stały monitoring geotechniczny oraz konstrukcyjny sąsiednich obiektów. Obejmuje on m.in. kontrolę przemieszczeń gruntu, pomiar osiadań oraz monitoring drgań oddziałujących na konstrukcje budynków [16]. Istotnym elementem działań prewencyjnych jest również odpowiednie



Fot. Marcin Stepien, Agencja Wyborcza.pl

Rys. 3. Oficyna kamienicy przy al. 1 Maja 23 w Łodzi

zabezpieczenie istniejącej zabudowy przed negatywnym wpływem prac podziemnych. W praktyce oznacza to stosowanie różnorodnych metod wzmacniania fundamentów budynków znajdujących się w strefie oddziaływania inwestycji, takich jak wbijanie pali, iniekcje cementowe czy wykorzystanie nowoczesnych technologii mikropali [17].

Analiza przedstawionych przypadków wskazuje, że katastrofy budowlane w zabudowie historycznej mają najczęściej charakter wieloczynnikowy, a ich powstawanie jest wynikiem jednoczesnego oddziaływania uwarunkowań geotechnicznych, niekontrolowanych ingerencji budowlanych oraz błędów diagnostycznych i projektowych (tab. 2).

4. Wnioski projektowe i diagnostyczne

Na podstawie przeprowadzonej analizy przypadków awarii i katastrof budowlanych w obiektach historycznych zwłaszcza w zabudowie śródmiejskiej, można sformułować poniższe wnioski projektowe i diagnostyczne.

Wszelkiego rodzaju prace budowlane prowadzone przy obiektach zabytkowych powinny być poprzedzone kompleksowymi badaniami historyczno-architektonicznymi [18] oraz szczegółową analizą stanu technicznego obiektu. Działania projektowe nie mogą wynikać wyłącznie z potrzeby dostosowania

Tabela 2. Typologia przyczyn katastrof budowlanych w zabudowie historycznej wraz z mechanizmami ich powstawania

Kategoria przyczyn	Typowe zjawiska	Mechanizm powstawania uszkodzeń
Uwarunkowania geotechniczne	zmiany poziomu wód gruntowych, podmycia fundamentów, osiadania gruntu, wykopy w sąsiedztwie budynków	zmiana warunków pracy fundamentów prowadzi do nierównomiernych osiadań, powstawania naprężeń rozciągających w murach oraz powstawania rys i pęknięć w elementach konstrukcyjnych
Ingerencje budowlane i eksploatacyjne	usuwanie ścian nośnych, wykonywanie nowych otworów w konstrukcji, brak zabezpieczeń tymczasowych, samowolne remonty	zaburzenie pierwotnego schematu statycznego konstrukcji i redystrybucja sił, prowadząca do przeciążenia pozostałych elementów nośnych
Błędy diagnostyczne i projektowe	niedoszacowanie stopnia degradacji materiałów, błędna ocena stanu technicznego, nieuwzględnienie wpływu nowych obciążeń lub inwestycji sąsiednich	przyjęcie nieprawidłowych założeń projektowych skutkujące przekroczeniem nośności elementów konstrukcyjnych lub utratą stateczności budynku
Oddziaływanie inwestycji infrastrukturalnych	budowa tuneli, głębokie wykopy, intensywne drgania od prac budowlanych	przemieszczenia gruntu i zmiany stanu naprężeń w podłożu, powodujące deformacje konstrukcji oraz uszkodzenia sąsiedniej zabudowy

obiektu do współczesnych wymagań użytkowych, lecz powinny opierać się przede wszystkim na rzetelnym rozpoznaniu jego struktury konstrukcyjnej, historii przekształceń oraz aktualnego stanu zachowania. Zwłaszcza w przypadku obiektów zlokalizowanych w zwartej zabudowie śródmiejskiej projektowanie robót budowlanych nie może ograniczać się wyłącznie do analizy pojedynczego obiektu, lecz powinno obejmować również ocenę wzajemnych oddziaływań pomiędzy budynkami sąsiednimi. Dotyczy to zarówno wpływu planowanych prac budowlanych na otaczającą zabudowę, jak i oddziaływania istniejących budynków na konstrukcję przebudowywanego obiektu. Analiza ta jest szczególnie istotna w przypadku prowadzenia prac ziemnych, przebudowy fundamentów, realizacji zabudowy plombowej lub ingerencji w elementy konstrukcyjne budynków.

W kontekście powyższych uwarunkowań można sformułować poniższe podstawowe zalecenia projektowe i diagnostyczne.

- Podstawowym warunkiem bezpiecznej przebudowy lub modernizacji obiektu zabytkowego jest wykonanie szczegółowej diagnostyki konstrukcji. Jak wskazuje Brunarski, istotne jest rozróżnienie trzech podstawowych typów diagnostyki: okresowej, doraźnej i docelowej, które stanowią podstawę do podejmowania decyzji projektowych [19].
- W procesie projektowym konieczne jest uwzględnienie rzeczywistego schematu statycznego konstrukcji budynku, który w obiektach historycznych często odbiega od schematu pierwotnego na skutek licznych przebudów i zmian funkcjonalnych.
- Istotnym elementem bezpiecznej realizacji robót jest etapowanie prac budowlanych, umożliwiające kontrolę zmian zachodzących w konstrukcji oraz ograniczenie ryzyka nagłej utraty stateczności elementów nośnych.
- W trakcie prowadzenia robót konieczne jest stosowanie odpowiednich zabezpieczeń tymczasowych, które zapewniają zachowanie stateczności konstrukcji w okresie przejściowym, gdy układ nośny obiektu ulega częściowej ingerencji.
- Niezbędnym elementem procesu inwestycyjnego jest monitoring konstrukcji prowadzony w trakcie realizacji robót budowlanych, pozwalający na bieżącą ocenę zachowania się obiektu oraz szybkie reagowanie w przypadku pojawienia się niepożądanych deformacji lub uszkodzeń [20].

Prace prowadzone przy obiektach zabytkowych obciążone są znacznym stopniem niepewności wynikającym z niepełnej wiedzy o stanie zachowania substancji zabytkowej oraz historii wcześniejszych przekształceń budynku. W wielu przypadkach rzeczywisty stan konstrukcji ujawnia się dopiero w trakcie intensywnej eksploatacji obiektu lub w sytuacjach zagrożenia, takich jak poważne awarie czy katastrofy budowlane.

5. Podsumowanie

Katastrofy budowlane w obiektach zabytkowych stanowią złożone zjawisko wynikające z oddziaływania wielu czynników technicznych, środowiskowych i organizacyjnych. Szczególnie istotne jest uwzględnienie specyfiki zwartej zabudowy

śródmiejskiej, w której procesy inwestycyjne oddziałują nie tylko na pojedynczy obiekt, lecz również na konstrukcję budynków sąsiednich. Istotnym elementem ograniczania ryzyka są zatem rozwiązania, wpisujące się w szersze podejście oparte na zarządzaniu ryzykiem katastrof w dziedzictwie kulturowym [21], coraz częściej podejmowane w dyskusjach dotyczących ochrony obiektów zabytkowych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Obwieszczenie Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 15 kwietnia 2022 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (z późn. zm.)
- [2] Zabytki urbanistyki i architektury w Polsce. Odbudowa i konserwacja, red. W. Zin, Warszawa, 1986
- [3] Opinia nr ZR 243 Zespołu Rzeczników przy Radzie Małopolskiej Okręgowej Izby Architektów RP w sprawie interpretacji przepisów dotyczących zabudowy śródmiejskiej, Kraków, 9 marca 2023 r. Źródło: <https://www.mpoia.pl/index.php/dzialalnosc/zespole-rzeczoznawcow?view=article&id=2197&catid=39> (dostęp 12.03.2026)
- [4] Baryłka A., Katastrofy budowlane istotnym problemem budownictwa w Polsce, Warszawa, Inżynieria Bezpieczeństwa Obiektów Antropogenicznych 4/2016, str. 38–47
- [5] Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane, Dz. U. 1994 Nr 89 poz. 414
- [6] Raporty roczne katastrof budowlanych GUNB 2019–2024, www.gov.pl/web/gunb/katastrofy-budowlane [dostęp 24.04.2026]
- [7] Drobiec Ł., Renowacje konstrukcji obiektów zabytkowych. Systematyka – uszkodzenia – naprawy. Cz. 1, Warszawa 2018
- [8] Ustawa z dnia 31 stycznia 1961 r. – Prawo budowlane (Dz.U. Nr 7, poz. 46 z późn. zm.)
- [9] Rozporządzenie Prezydenta Rzeczypospolitej z dnia 16 lutego 1928 r. o prawie budowlanemu i zabudowaniu osiedli
- [10] Nepelski K., Charakterystyka lessów lubelskich jako podłoża budowlanego, Przegląd Geologiczny 12/2021, str. 835
- [11] Afelt A., Sufozja: proces filtracyjnego przekształcania skał, Prace i Studia Geograficzne 38, 2007, str. 159–174
- [12] Damicz J., Srokosz P.E., Przyczyny uszkodzeń budynku mieszkalno-usługowego, Awarie Budowlane: zapobieganie, diagnostyka, naprawy, rekonstrukcje: XXIII Konferencja Naukowo-Techniczna 2007, 23-05-2007-26-05-2007, Szczecin-Międzyzdroje, Szczecin, 2007
- [13] Dohojda M., Jeleniewicz K., Witkowska-Dobrev J., Szlachetka O., Stan techniczny przedwojennych budynków w obliczu nowych inwestycji komunalnych na przykładzie kamienicy z 1912 roku, Acta Scientiarum, Polonorum Architectura 19(3)2020, str. 3–14
- [14] Filas-Zajac P., Szanse i zagrożenia dla wnętrza mieszkalnych w kamienicach Starego Miasta w Warszawie w kontekście prac remontowo-budowlanych, [w:] Odbudować nieodbudowane. Problematyka odbudowy i rekonstrukcji w świetle współczesnych wyzwań, Warszawa 2025, str. 320–336
- [15] Sekunda R., Wybrane problemy utrzymania należytego stanu technicznego wielorodzinnych budynków mieszkalnych, Przegląd Budowlany 1/2020, str. 32–37
- [16] Norma PN-B-02170:2017–12: Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki
- [17] Godlewski T., Bogusz W., Siemińska-Lewandowska A., Bezpieczeństwo obiektów budowlanych w sąsiedztwie tuneli, Instrukcja ITB nr 505/2024, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa, 2024
- [18] Tajchman J., Standardy w zakresie projektowania, realizacji i nadzorów prac konserwatorskich dotyczących zabytków architektury i budownictwa, Toruń-Warszawa, 2014
- [19] Brunarski L., Runkiewicz L., Diagnostyka obiektów budowlanych. Referat na 56 Konferencji Naukowej Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZITB, 19-24.09.2010, Kielce – Krynica, 2010
- [20] Wilde K., Systemy monitoringu konstrukcji obiektów budowlanych, XXVI Konferencja Naukowo-Techniczna Awarie Budowlane, Międzyzdroje, 2013
- [21] Managing Disaster Risks for World Heritage, oprac. UNESCO, ICCROM, ICOMOS, IUCN 2010

Dylematy prefabrykacji wczoraj i dziś. Architektoniczny wymiar projektowania

Dilemmas of prefabrication yesterday and today. Architecture as a system

dr hab. inż. arch. Jacek Kwiatkowski, prof. SGGW (ORCID: 0000-0001-8221-2194),
prof. dr hab. inż. arch. Monika Trojanowska (ORCID: 0000-0001-8168-0746), dr inż. arch. Oskar Amiri (ORCID: 0009-0003-5117-6102), Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7934

Streszczenie: Istotą prefabrykacji jest przyspieszenie budowy i redukcja kosztów. Le Corbusier, inspirując się przemysłem samochodowym, stworzył ideę „domu-maszyny”, wierząc w standaryzację i seryjność. Od początku standaryzacja miała oznaczać wysoką jakość zarówno techniczną, jak i estetyczną. Również dzisiaj współczesne realizacje w Polsce udowadniają, że prefabrykacja to może być pole dla ambitnej architektury.

Słowa kluczowe: prefabrykacja, architektura, Le Corbusier, Citrohan, Bauhaus.

Abstract: The essence of prefabrication is to accelerate construction and reduce costs. Le Corbusier, inspired by the automotive industry, created the idea of the „machine house”, believing in standardization and mass production. From the outset, standardization was intended to imply high quality, both technical and aesthetic. Contemporary projects in Poland continue to demonstrate that prefabrication can be a hub for ambitious architecture.

Keywords: prefabrication, architecture, Le Corbusier, Citrohan, Bauhaus.

1. Wprowadzenie

Prefabrykacja – od „maszyny do mieszkania” po nowoczesność

Pionier modernizmu, Le Corbusier, postrzegał dom jako „maszynę do mieszkania” – seryjnie produkowany produkt o wysokim standardzie etycznym i estetycznym. Jego projekty, oparte na standaryzacji i wymienności elementów, stały się fundamentem nowoczesnego myślenia o architekturze jako systemie. Współczesna prefabrykacja w Polsce przeżywa renesans. Nowoczesne realizacje, takie jak budynek przy ul. Sprzecznej 4 w Warszawie czy osiedle Nowe Żerniki we Wrocławiu udowadniają, że beton prefabrykowany pozwala na uzyskanie unikalnej estetyki i precyzji detalu.

2. Problem badawczy i metoda pracy

Głównym problemem badawczym artykułu jest poszukiwanie balansu między technologiczną koniecznością standaryzacji i modułowości (wynikającą z dążenia do szybkości i redukcji kosztów) a potrzebą zachowania indywidualizmu architektury. W pracy przedstawiono analizę ewolucji prefabrykacji w budownictwie, zestawiając historyczne fundamenty modernizmu pionierów prefabrykacji – Le Corbusiera i Waltera Gropiusa, ze współczesnymi realizacjami w Polsce. Autorzy stawiają tezę, że dylemat prefabrykacji nie powinien ograniczać się do aspektów technicznych (logistyka, transport, konstrukcja), lecz musi obejmować wymiar architektoniczny. Ciekawym pytaniem badawczym

są kluczowe dylematy, przed którymi staje architekt korzystający z prefabrykacji. W pracy zastosowano kilka teoretycznych, jakościowych metod naukowych: analizy i krytyki piśmiennictwa (*desk research, content analysis, web scraping*) oraz analizy porównawczej studium przypadku.

3. Prefabrykacja w działalności Le Corbusiera i modernistów

Istotą prefabrykacji było od zawsze przyspieszenie procesu budowlanego przy jednoczesnym ograniczeniu jego kosztów. Przełomem w światowym podejściu do poszukiwania prefabrykacji w procesach budowlanych był sukces Henry’ego Forda po wprowadzaniu ruchomej taśmy produkcyjnej w 1913 roku. Sukces ten, który zrewolucjonizował przemysł samochodowy, obniżając koszty produkcji modelu Forda T niemal 12-krotnie, umożliwił znaczne redukcje ceny produktu. Architekci i inwestorzy, a również interesariusze całego rynku mieszkaniowego marzyli, aby podobny przełom nastąpił w dziedzinie mieszkalnictwa. Le Corbusier na przykład gorąco wierzył, że przełom taki jest możliwy.

Oto fragment jego wypowiedzi: „Jeżeli wyeliminujemy z naszych serc przestarzałe koncepcje domu i spojrzymy na zagadnienie z krytycznego i obiektywnego punktu widzenia dojdziemy do domu maszyny seryjnie produkowanego(...) domu dostępnego dla każdego (...) w ten sam sposób jak piękne są narzędzia pracy, które towarzyszą naszemu życiu” [1, 2].

„[...] niemożliwe jest czekanie przy powolnie biegnącej współpracy kolejno następujących wysiłków robotnika ziemnego, murarza, cieśli, stolarza, kaflarza, hydraulika [...] domy muszą być stawiane w jednym bloku, muszą być wykonywane przez maszyny w fabryce i składane tak jak Ford składa samochody, na ruchomych taśmach” [1].

Fascynacja ideą H. Forda poprowadziła Le Corbusiera do rzeczywistego nawiązania jego idei domu jednorodzinnego „dla każdego” z produkcją samochodu – ówczesnego odpowiednika forda T na rynku francuskim, czyli samochodu marki Citroën 2CV – popularnie nazywanego blaszanką. Nie miał on panoramicznych szyb, miał miękki dach składany z płótna, a jego nadwozie złożone było z lekkich blach prasowanych, a nie tłoczonych. Pomimo to, był on niezwykle popularny, ze względu na niską cenę i niezawodność. Świadczy o tym długoletnia jego obecność na rynku – był produkowany w latach 1949–1990, osiągając łączny pułap sprzedaży bliski 4 mln pojazdów. Le Corbusier kierował się podobnie jak w tym znanym modelu prostotą konstrukcji, powtarzalnością elementów budowlanych oraz ich ceną. Również nazwę swojego domu dla masowego odbiorcy ostentacyjnie powiązał właśnie ze wspomnianą firmą motoryzacyjną – nazywając swój model domu Maison Citrohan. Miał to być dom kompaktowy, o dwóch gładkich ścianach, zamykających przestrzeń domu w dwóch wysokich autonomicznych kondygnacjach mieszkalnych. Wzór i idea domu – z charakterystyczną, centralną antresolą, jako sercem domu – zostały zaczerpnięte z małych tanich paryskich restauracyjek i podmiejskich bistro, w których bywał częstym, niemal codziennym gościem przez całe swoje życie. Idea została rozwinięta i wykorzystana przy projekcie osiedla Pessac. Możemy tam obserwować użycie częściowo prefabrykowanych elementów tworzących powtarzalne segmenty mieszkaniowe, zaprojektowane jednak w taki sposób, że nie ujawniają na pierwszy rzut oka zastosowanej metody [3]. Wachlarz propozycji zawierał szereg wariantów finansowych od rozwiązań najprostszych – niskobudżetowych, na przykład mieszkań fabrycznych, poprzez mieszkania-pracownie artystyczne, aż po wille i rezydencje dla bogatych. Poszczególne grupy budynków chociaż są wzniesione z podobnych elementów, ale ustawione pod różnym kątem celowo uwydatniają różnice, a nie podobieństwa, na przykład dostrzegamy na pierwszy rzut oka podział na budynki wysokie i niskie, a nie ich modularność. Dodatkowo różnicuje ten układ staranny dobór różnych form zieleni (rys. 1 i 2). Dzięki temu uzyskano skalę małego osiedla o ludzkiej skali [4]. Dobrym przykładem jest tutaj pokazane na ilustracjach osiedle Pessac we Francji (rys. 1 i 2). Wydawać by się mogło, że zastosowane tam rozwiązania staną się modelowe i zyskają aplauz społeczny, a chociażby aplauz przyszłych mieszkańców. Tak się jednak nie stało. Osiedle straciło swoją czystość formy poprzez liczne przeróbki wprowadzone przez poszczególnych właścicieli zrealizowanych tu segmentów w perspektywie wielu kolejnych lat. Był to już wtedy wyraźny i niepokojący sygnał, że modernizm zmierza w kierunku dogmatyzmu ideowego, z którego trudno mu będzie już później zawrócić.



Rys. 1. Quartiers Modernes Frugès, Pessac [23]



Rys. 2. Cité Frugès – Pessac, Francja (1924) [24]

Standaryzacja procesów budowlanych miała u swych podstaw właśnie etos maszyny, nie zaś troski o wdrożenie nowych materiałów budowlanych. Dom miał być narzędziem – w domyśle – ułatwiającym życie, nie zaś laboratorium nowych procesów technologicznych. Systematyzacją objęto nie tylko ściany budynków, ale też szkielet konstrukcyjny i fundamentowanie. Le Corbusier zmierzał do tego, aby nowy dom-maszyna mógł być eksploatowany i „naprawiany” jak maszyna poprzez wymianę niefunkcjonujących prawidłowo elementów – wymianę wadliwych podzespołów, wyprodukowanych wcześniej i gotowych do zastosowania. Przyświecała mu idea zastępowalności substancji budowlanej podobnie jak wcześniejszym futurystom, którzy głosili, że: „każde pokolenie będzie budowało swoje własne domy [3].

4. Prefabrykacja w programach Bauhausu

Bauhaus od samego początku hołdował zasadzie wychowywania przez sztukę. I tu warto przypomnieć, że Bauhaus był przede wszystkim szkołą, uczelnią wyrosłą z połączenia Akademii Sztuk Pięknych i Szkoły Rzemiosł Artystycznych w 1919 r. Jeden z jego twórców W. Gropius wierzył, że należy ludzi „wychowywać” do odpowiedniego odbioru nowoczesnej architektury. Głosił maksymę, że społeczeństwo otrzymuje taką architekturę, do jakiej dojrzało. Czy to jemu jednak zawdzięczamy odkrycie, że zorganizowana przestrzeń wpływa na sposób działania i myślenia ludzi, a zatem istnieje społeczna rola architekta jako „projektanta życia społecznego”, a nie tylko projektanta budowli?

Wątpliwości w tym kontekście budzi fakt, że niemal identyczne słowa wypowiedział Kazimierz Malewicz parę lat wcześniej, co ujrzało światło dzienne dopiero kilkanaście lat temu w wyniku opublikowania jego prac naukowych [4].

Bauhaus proklamował funkcjonalność architektury, której istota jest oparta nie tylko na przesłankach mechanicznych i ergonomicznych (jak np. wymiary ciała człowieka), ale także psychologicznych. Gropius zauważył, że czystość form inspirowała intelektualnie, porządkuje i dyscyplinuje myśli człowieka [5].

Bauhaus był prekursorem w tworzeniu zespołów projektowych o charakterze interdyscyplinarnym, poprzedzonych indywidualną deklaracją dobrowolnej chęci współpracy, czego nawet współcześnie wciąż jeszcze nie osiągnęliśmy. Przesłanką dla Bauhausu aktywizacji nowych form w budownictwie była potrzeba znacznego obniżenia kosztów budowy poprzez użycie materiałów powtarzalnych, uproszczenie organizacji pracy na budowie oraz znaczne ograniczenie metrażu nowoprojektowanych mieszkań. Wynikało to ze statystyk opublikowanych w pierwszych latach Republiki Wajmarskiej. Zgodnie z danymi (z 1925 r.) występującymi w dokumentach GEHAG i GAGFAH, w całych Niemczech brakowało jeszcze w tym czasie aż 900 tys. mieszkań przy założeniu zamieszkania 2 osób na izbę [6, 7]. Zalecano jako wskazane i opłacalne, projektowanie i oddawanie do użytku mieszkań w wielkich zespołach zabudowy wielorodzinnej, budowanych na średnim lub płytkim trakcie konstrukcyjnym. Sam W. Gropius był z kolei zwolennikiem szerokiego stosowania wywłaszczeń i budowy na gruntach gminnych. Te radykalne poglądy wynikały z przyjętej przez niego ewolucyjnej teorii społecznej Müller-Lyera głoszącej wypieranie formacji społecznych mniej doskonałych przez bardziej doskonałe według następstwa: jednostka – rodzina – kolektyw spółdzielców. Stąd zakładał również daleko posuniętą autonomię samorządów lokalnych, które miały skupiać szerokie uprawnienia nadawane im przez wspólnoty sąsiedzkie. One to głównie byłyby właścicielami gruntów w wyniku wcześniej wspomnianych wywłaszczeń. Gropius twierdził, że tempo życia wymusza minimalizację, gdyż człowiek epoki maszyn nie ma czasu na pokonywanie zbędnych przestrzeni [6], toteż jego zdaniem, wielkość miejskiej jednostki sąsiedzkiej (znanej wcześniej z opracowań C. Perry'ego) nie powinna przekraczać dystansu możliwego do osiągnięcia w 10 do 15 minut drogi piechotą. Bliski jest on tutaj również idei Ebenezera Howarda i jego Miasta – Ogrodu. Przyjęcie tego postulatu zawężało sąsiedzką przestrzeń aktywności do promienia wielkości półmili. System ten – zakładając zabudowę wysoką – wyłamywał się w sposób istotny z naturalnych podziałów własnościowych gruntu, które z reguły szły prostopadłe do osi dróg i ulic. Stąd warunkiem koniecznym powodzenia całego przedsięwzięcia musiał być często stosowany mechanizm wywłaszczenia. Korespondowało to bardzo, z jego kolejnymi postulatami, takimi jak wprowadzanie prefabrykacji, czy minimalizacja powierzchni mieszkań, poprzez wprowadzanie kuchni – laboratoriów, w odpowiedzi na emancypację kobiet i ich coraz częściej podejmowaną pracę zawodową. Jego zdaniem: „kobieta pracująca, nie mająca czasu na zajmowanie się domem, powinna zamieszkać w małym mieszkaniu, w budownictwie wysokim wyposażonym

w kolektywne urządzenia usługowe” [6]. Już w 1923 roku zaproponował tak zwany Wielki Moduł system „Baukasten im Großen”, którego celem było tworzenie domów z gotowych zestawów elementów prefabrykowanych. Twierdził, że elementy prefabrykowane powinny być tak wytwarzane, aby dawały szerokie możliwości dla wielu różnych wariantów projektowych. Jego dewizą w tej kwestii było „maksymalna standaryzacja przy maksymalnej różnorodności form”. Skłaniał się w kierunku modularyzacji – co już w tym czasie podejmował Ernest Neufert, nie natomiast prefabrykacji segmentowej, jaką stosował Le Corbusier. To właśnie przez Bauhaus zostaje ukute pojęcie technologicznego i nietechnologicznego zastosowania materiałów. Jako priorytet – warunek *sine qua non* nowej roli budownictwa mieszkaniowego Gropius uważał podporządkowanie układu urbanistycznego możliwościom jak najlepszego oświetlenia budynków, co niestety w efekcie zaowocowało monotonią długich prostych pasm zabudowy. Gropius był też prekursorem wdrażania nowych systemów uprzemysłowienia wykonawstwa. Jednocześnie zabiegał o wprowadzenie w architekturze lokalnych materiałów i regionalnych tradycji, z uwzględnieniem kontekstu lokalnych krajobrazów oraz zwyczajów mieszkańców.

Gropius jako funkcjonalista wyznawał zasadę odciążenia bryły budynku na rzecz jego szkieletu konstrukcyjnego twierdząc, że to: „funkcja determinuje formę a nie odwrotnie, podobnie głosił aksjomat: to co użyteczne jest piękne – czysta konstrukcja musi być piękna”. Miało to swój wyraz w stosowaniu przez niego lekkich, szklanych ścian osłonowych i izolacyjnych, które nie przenosiły obciążeń konstrukcyjnych budynku. Można tu przywołać dwa sztandarowe przykłady tych zastosowań, w których był prekursorem, czyli narożniki bryły głównej Fabryki Fagus (1911–1913) oraz budynek Bauhausu w Dessau (1925–1926), zastosował tu szklane elewacje kurtynowe.

W okresie amerykańskim (lata 40. XX wieku) Gropius doprowadził do opracowania systemu uprzemysłowienia budownictwa mieszkaniowego, gdzie wraz z Konradem Wachsmannem opracował system pod nazwą Packaged House, który opierał się na modułowych, prefabrykowanych panelach ściennych i izolacyjnych, umożliwiających szybki montaż.

Radykalizm działań Waltera Gropiusa zwłaszcza w okresie jego działalności w Niemczech prowadził nierzadko do impasów. Takim przykładem może być tutaj sztandarowa realizacja osiedla Törten w Dessau, gdzie pomimo ambitnego programu, miasto rozwiązało umowę z projektantem ze względu na znaczne przekroczenia wynegocjowanego budżetu. Paradoks tej sytuacji polegał na tym, że miało to być wzorcowe osiedle niskobudżetowe, dla robotników o niewygórowanych możliwościach finansowych. Technologia była tu właśnie oparta o elementy prefabrykowane sporządzane na placu budowy. Osiedle składało się z 314 dwukondygnacyjnych domów wielorodzinnych i szeregowych o niewielkim metrażu (57–75 m²), w stylu wczesnego funkcjonalizmu. Ostatecznie osiedle powstało, można powiedzieć więcej – utworowało drogę do późniejszego pojęcia – stylu Bauhaus silnie reprezentowanego na przykład w zabudowie mieszkaniowej współczesnego Tel Aawiwu. Jest

to przestroga dla współczesnych twórców, gdzie przekroczenia budżetu zdarzają się niestety również relatywnie często.

5. Pomiędzy przełomem a kontynuacją

Tendencje do poszukiwania rozwiązań na rzecz działań w obszarze prefabrykacji elementów budowlanych zostały wstrzymane jedynie na czas II wojny światowej. Co ciekawe, na przykład okres wczesnopowojenny w Polsce, formalnie poprzedzający jeszcze, nadchodzący w nieodległej perspektywie – socrealizm zawierał rozbudowane doświadczenia w tym zakresie. Już w 1948 roku ożyła dyskusja nad objęciem w Planie Inwestycyjnym sektora mieszkaniowego [9] również mieszkalnictwa społecznego, jak też prywatnej inicjatywy budowlanej realizowanych z udziałem prefabrykacji. Dowodem tych dyskusji jest konkurs SARP (1948) na projekty domów jednorodzinnych do masowej prefabrykacji, a z ramienia Instytutu Badania Budownictwa został zrealizowany pilotażowy zespół domów jednorodzinnych z częściowo prefabrykowanych ścian gruzobetonowych o minimalistycznej powierzchni 45 m² [10, 11]. Szeroką skalę stosowania prefabrykacji przyniósł jednak dopiero koniec socrealizmu. Od wczesnych lat 60. ubiegłego wieku wdrażano sukcesywnie eksperymenty z prefabrykacją prowadzone jeszcze w latach 50., choć wtedy jedynie w ośrodkach badawczych. Rozwiązaniem tym był Wielki Blok, czyli powszechnie stosowana wtedy nazwa – Płyta Żerańska (nazwa pochodziła od miejsca produkcji tych elementów). Apogeum jej stosowania przypadało na lata 1960–1973 [12]. W miarę upływu czasu pojawiały się nowe rozwiązania takie jak Wielka Płyta i Rama H i tu zaznaczyć trzeba, że były to dwie odrębne technologie prefabrykacji niestanowiące kontynuacji. Wielka płyta dawała możliwości wznoszenia budynków z gotowych elementów prefabrykowanych, przygotowywanych w fabrykach domów, był to system obejmujący szeroki zakres form, takich jak ściany zewnętrzne, stropy, schody, szyby windowe, ściany działowe itd. [13]. Paradoks rozwoju kolejnych systemów polegał na tym, że te najbardziej zaawansowane i niosące stosunkowo duży wachlarz rozwiązań dla projektantów – czyli Wielka Płyta okazała się jednocześnie najbardziej wrażliwa na degradację wraz z upływem czasu [13]. Dodatkowo – jeden z kluczowych atutów tej technologii, czyli niższe koszty budowy – często nie był osiągalny, ze względu na konieczność dodatkowych kosztów dozbierania każdego elementu wynikających z potrzeb transportu, aby przeciwdziałać masowemu pękaniu elementów (inne naprężenia płyt podczas przewożenia).

6. Dylematy prefabrykacji w Polsce dzisiaj

W powszechnym, popularnym ujęciu przyjęło się stosowanie podziału na prefabrykację dwu- i trójwymiarową. Ta pierwsza dotyczy produkcji elementów, takich jak ściany, stropy czy panele dachowe, które wykonywane w fabryce, są przewożone na budowę i łączone ze sobą, tworząc strukturę przestrzenną. Takie elementy najczęściej pozbawione są warstw wykończeniowych, skrócenie procesu produkcji jest

zatem jedynie częściowe. Zaletą tego poziomu prefabrykacji jest jednak względna swoboda w kształtowaniu samego obiektu. Minusem pozostaje ilość prac do wykonania na budowie. Wśród nich pozostają czasochłonne prace mokre, takie jak posadzki, tynki elewacyjne, czy też montaż instalacji prowadzonych w przegrodach (instalacja elektryczna w rurach osłonowych czy wodno-kanalizacyjna w posadzkach).

Prefabrykacja opierająca się na wykonaniu w fabryce przestrzennych, trójwymiarowych elementów, ich przewiezieniu i ułożeniu na przygotowanym podłożu (np. płycie fundamentowej) oraz połączeniu ze sobą jako elementów budynku – a w skrajnych przypadkach wręcz gotowych, niewielkich budynków – jest kolejnym, wyższym stopniem zastosowania tego procesu. Nierzadko takie przestrzenne prostopadłościennymi struktury są już wyposażone w instalacje i wewnętrzne materiały wykończeniowe. Bardziej żmudne jest natomiast ich odpowiednie dopasowanie do siebie na placu budowy – z uwagi na znacznie większy ciężar, elementy te podczas przenoszenia dźwigiem na docelowe miejsce czasowo się odkształcają, co utrudnia zestawienie ze sobą poszczególnych modułów.

Prefabrykacja procesu budowlanego i jej ewentualny sukces zależą także od stopnia unifikacji. Zależność ta dotyczy w zasadzie każdego stopnia prefabrykacji, jest jednak szczególnie widoczna w prefabrykacji trójwymiarowej. Każda powtarzalność procesów produkcyjnych skraca ich czas, a zatem czas całego procesu budowlanego, co przekłada się na bilans finansowy inwestycji, zarówno po stronie wykonawcy, jak i inwestora.

7. Transport i ograniczenia gabarytowe

Wykonywanie elementów budynków lub całych, niewielkich obiektów budowlanych poza placem budowy wiąże się z procesem logistycznym bezpiecznego załadunku, transportu, rozładunku oraz montażu. W pierwszym z tych kroków ograniczenie stanowi jedynie infrastruktura wykonawcy – hala produkcyjna, przestrzeń manewrowa w jej otoczeniu, nośność urządzeń itd. Podczas przewożenia elementów na docelowe miejsce ograniczeniem mogą być regulacje transportu drogowego – nieprzekraczalne rozmiary gabarytów, rozmiar skrajni drogowej, dopuszczalne obciążenie dróg i mostów prowadzących na plac budowy, ewentualne zawężenie możliwości transportu do niektórych godzin lub dodatkowe wymogi dla transportu ponadgabarytowego. Z perspektywy projektanta szczególnie wpływowym ograniczeniem jest to dotyczące wysokości przewożonych elementów, których pochodną jest możliwość realizacji odpowiedniej wysokości użytkowej pomieszczeń. Potencjalnie największym zagrożeniem możliwości realizacji budowy z wykorzystaniem procesów prefabrykacji stanowi jednak dostępność i warunki terenowe samego placu budowy. Konieczność zapewnienia możliwości wjazdu i rozstawienia dźwigu, miejsca do manewrowania i operowania w niektórych przypadkach okazuje się czynnikiem, który uniemożliwia lub ogranicza stopień prefabrykacji, np. do lżejszych, dwuwymiarowych paneli. Warto zwrócić uwagę na przykład krakowskiego

„Telpodu”, gdzie dawny budynek przemysłowy został zaadaptowany na nowoczesny dom studencki z wykorzystaniem technologii prefabrykowanej ścian zewnętrznych, w których osadzone zostały okna. Produkcja paneli ściennych w całości była realizowana w fabryce Unihouse SA przez firmę Unibep SA. Po dostarczeniu ścian na budowę montowane były na specjalnie przygotowanych stalowych konsolach stanowiących obciążenie słupów. W trakcie realizacji pojawiły się dylematy logistyczne. Problemem okazał się, m.in. transport wielkogabarytowych elementów w gęstej tkance miejskiej Krakowa, na co wskazał Jerzy Rożko, kierownik budowy nadzorujący prace [14–16].

8. Ograniczenia konstrukcyjne

Prefabrykacja obiektów, zwłaszcza w stopniu wyższym, tj. z zastosowaniem przestrzennych trójwymiarowych modułów, wiąże się z dostosowaniem do pewnych ograniczeń architektonicznych, co szczególnie jest uwidacznione w kształtowaniu rzutów tych obiektów. Im bardziej zunifikowana struktura obiektu, wykorzystująca powtarzalne elementy, tym skuteczniejszy jest proces samej prefabrykacji. Z drugiej strony, w pewnym stopniu analogicznie do technologii wielkiej płyty, pełna standaryzacja gabarytowa niesie ze sobą duże ograniczenia. Jest to szczególnie widoczne w obiektach użyteczności publicznej o wyższych wymaganiach dotyczących ochrony pożarowej – np. minimalnych szerokości i długości dojazdów i przejść ewakuacyjnych. Zależnie od wybranej technologii, mogą także istnieć ograniczenia *stricte* konstrukcyjne, związane z nośnością, stabilnością i ograniczeniami rozpiętości różnych elementów budynku. Przykładem technologii, które są związane z dość licznymi ograniczeniami o takim charakterze, są te oparte na drewnie – np. szkielecie drewniany czy też CLT.

9. Dylematy estetyczne

Jednym z głównych wyzwań dla architekta jest znalezienie balansu między modułowością a indywidualnym charakterem obiektu. Prefabrykacja pozwala na wykorzystanie podstawowych zalet materiału – możliwość formowania konstrukcji o niebanalnych kształtach. Współczesne formy pozwalają na dużą dowolność (np. matryce strukturalne dla betonu), jednak każdy niestandardowy element drastycznie podnosi koszty matrycy i produkcji. W przypadku dużych, wielkoskalowych obiektów koszty prefabrykacji niestandardowych elementów mogą być ekonomicznie uzasadnione. W przypadku niewielkiej liczby powtarzalnych elementów argumentami mogą być: krótszy czas wytworzenia i montażu elementów prefabrykowanych na budowie.

Współczesna prefabrykacja dzieli się na różne segmenty:

- prefabrykacja betonowa (elementy konstrukcyjne),
- prefabrykacja drewniana (elementy konstrukcyjne, elementy wykończeniowe),
- budownictwo modułowe (budynki mieszkalne, biurowe, użyteczności publicznej) [17].

Marcin Charciarek i Paweł Mika wskazują, że estetyka elewacji wykonanych z betonu staje się często rodzajem manifestu obiektów zrównoważonych ekologicznie [17, 18]. Prefabrykacja staje się celowo wybraną technologią dla implementacji wizji estetycznych architekta (ibidem). Ikoniczną realizacją dla współczesnej polskiej prefabrykacji betonowej jest budynek wielorodzinny przy ul. Sprzecznej 4 w Warszawie (Pracownia BBGK Architekci) [19]. Realizacja stanowi przykład przełamania mitu, że prefabrykacja elementów fasadowych musi być szara i nudna. Architekci rozwiązali dylematy estetyczne prefabrykacji stosując barwiony w masie beton czerwony, odciski graficzne na elewacji oraz płaskorzeźby. Budynek powstał jako „manifest” możliwości technologicznych. Pokazuje, że prefabrykacja pozwala na niezwykłą precyzję detalu, której nie da się uzyskać metodą moką na budowie. Kolejny dylemat dotyczył kwestii ekonomicznych. Koszt matrycy i form jednostkowych przy tak skomplikowanej elewacji był wyzwaniem dla budżetu, ale stał się inwestycją w marketing technologii. Budynek stał się manifestem możliwości prefabrykacji i technologii wielkiej płyty.

Dobrym przykładem poszukiwania nowatorskich rozwiązań jest Osiedle Nowe Żerniki we Wrocławiu [20]. Na terenie osiedla powstało kilka obiektów prefabrykowanych, które miały odczarować prefabrykację. Przykładem może być biurowiec przy Al. Architektów, autorstwa pracowni projektowej Maćków [20–22] – rysunek 3. Uwagę przykuwają prefabrykowane elementy betonowe z wyeksponowanym kruszywem, które wykonała firma Betard Sp. z o.o. [22]. Obok elementów ścian w zakładzie prefabrykacji wykonano również słupy i belki oraz elementy małej architektury – donice, ławki, stoły oraz ściany oporowe i płyty chodnikowe, również z wyeksponowanym kruszywem. Elementy elewacyjne wykonano w technologii betonu w klasie C35/45 z domieszkami upłynniającą, stabilizującą i napowietrzającą [22]. Potrzebna była też domieszka przyspieszająca wiązanie ze względu na produkcję elementów w okresie zimowym i małe przekroje poprzeczne elementów. Widoczne na elewacjach kruszywo



Rys. 3. Wrocław, Nowe Żerniki, biurowiec przy Al. Architektów, autorstwa pracowni projektowej Maćków; uwagę przykuwają prefabrykowane elementy betonowe z wyeksponowanym kruszywem, które wykonała firma Betard Sp. z o.o. (fot. dzięki uprzejmości firmy Betard Sp. z o.o.)

Rys. 4, 5. *Pasaż pieszy na osiedlu Nowe Żerniki we Wrocławiu; prefabrykowane elementy małej architektury wpisują się w modernistyczną estetykę osiedla, estetyka osiedla nawiązuje do koncepcji Le Corbusiera (źródło: fot. arch. prywatne MT)*



granitowe to frakcje 2–8 mm i 8–16 mm odsłonięte w procesie płukania wodą betonu po osiągnięciu wytrzymałości (ibidem). Dodatkowo, gotowe wyroby zostały zabezpieczone przed działaniem niekorzystnych warunków atmosferycznych impregnatem powierzchniowym [22]. Dzięki wysokiej jakości prefabrykatów betonowych uzyskano architekturę o minimalistycznym charakterze. Innym wyzwaniem budowy osiedla Nowe Żerniki była koordynacja wielu podwykonawców w systemie modułowym na placu budowy o tak dużej skali [20]. Estetyka osiedla nawiązuje do koncepcji Le Corbusiera, które wydają się nadal równie aktualne, co 100 lat temu (rys. 4, 5).

10. Podsumowanie

Kluczowe idee Le Corbusiera, takie jak „dom jako maszyna do mieszkania” oraz zasady modularności i standaryzacji ukształtowały współczesne podejście do prefabrykacji. W szkole Bauhaus kładziono nacisk na łączenie sztuki z rzemiosłem oraz funkcjonalność. Do dzisiaj podejście Bauhausu inspirowało projektowanie modułowych budynków i rozwój nowoczesnych materiałów prefabrykowanych. Dzisiejsze dylematy estetyczne prefabrykacji to konieczność kompromisu między standaryzacją a indywidualnym charakterem projektów. Przykłady z Polski ilustrują innowacyjne rozwiązania, które łączą efektywność produkcji z nowatorską architekturą.

Prefabrykacja może jednocześnie zwiększać wydajność i otwierać nowe możliwości estetyczne, lecz wymaga starannej harmonizacji procesów projektowych, logistycznych oraz regulacyjnych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Le Corbusier, *Vers une architecture*, Éditions Crès, Collection de L'Esprit Nouveau, Paris, 1923
- [2] Le Corbusier, Fragment proklamacji zamieszczony w czasopiśmie L'Esprit Nouveau Nr 2, 1920, Paris
- [3] Le Corbusier, Jeanneret P.– którzy byli odpowiedzialni za plan generalny i poszczególne budynki – nawiązanie do manifestu – *Vers une Architecture*, 1922, Cité Frugès de Pessac, <https://trek.zone/pl/francja/miej-sca/233721/quartiers-modernes-fruges-pessac> (dostęp 20.03.26)
- [4] Kwiatkowski J., *Oko pod kontrolę dotyku duszy. Suprematyzm we współczesnym dyskursie intelektualnym*, Zakład Graficzny Uniwersytetu Warszawskiego, Fundacja Uniwersytetu Warszawskiego, 2013
- [5] Banham R., *Rewolucja w architekturze. Teoria i projektowanie w pierwszym wieku maszyny*, Wydawnictwa Artystyczne i Filmowe, 1979
- [6] Gropius W., *Pełnia architektury*, Wydawnictwo Karakter, Kraków, 2014
- [7] Syrkus H., *Spółeczne cele urbanizacji. Człowiek i środowisko*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1984
- [8] Rozbicka M., *Budownictwo jednorodzinne w Warszawie w latach 1945–1960; podstawy, rozwój, architektura*, Politechnika Warszawska, Wydział Architektury, [w:] *Architektura XX wieku – jej badania i popularyza-*
- cja w Gdyni i w Europie, *Modernizm w Europie – Modernizm w Gdyni*, 6/2019, Gdynia, Gdańsk, Politechnika Gdańska, Urząd Miasta Gdyni
- [9] Akcja finansowania budownictwa mieszkaniowego przez BGK w latach 45–47, *Dom, Osiedle, Mieszkanie* 3–4/1948, str. 10
- [10] *Domki doświadczalne Instytutu Badania Budownictwa, Dom, Osiedle, Mieszkanie* 3–4/1948, str. 25, 5–9, str. 39
- [11] Cissowski T., *Domki z gruzobetonu*, *Stolica* 20, 1948, str. 13
- [12] System wieloblokowy Ż., 15 lutego 2017, dostępne na: http://www.relaiscdco.eu/budownictwo/system-wieloblokowy-z#google_vignette (dostęp 14 kwietnia 2026)
- [13] Przedsiębiorstwo Budowlane Design.pl; *Wielka płyta a rama H – podobieństwa i różnice* – Blog, *Budowlane ABC*, dostępne na: <https://www.pb-design.pl/wielka-plyta-rama-podobienstwa-roznice/> (dostęp 21 marca 2026)
- [14] LivinnX Kraków – a new standard for student hotel design from IMB Asymetria, dostępne na: <http://imbasymetria.pl/news-en/4> (dostęp: 6 marca 2026)
- [15] Cudowne lata studenckie w akademiku LivinnX, Kraków (PL), dostępne na: <https://www.geberit.pl/rozwiązania-publiczne/referencje/livinnx/> (dostęp: 6 marca 2026)
- [16] Charciarek M., (2024) The use of precast concrete façade elements in selected projects of new Polish public buildings. *Formal meanings and technology*, *Architectus* 3(79)2024, doi:10.37190/arc240305
- [17] Mika P. Concrete – the design of public spaces in terms of material and technology energy efficiency, *Technical Transactions* 111, 2014, str. 165–173, https://www.researchgate.net/publication/279202447_Concrete_-_the_design_of_public_spaces_in_terms_of_material_and_technology_energy_efficiency
- [18] *Sprzecznica 4. Budynek zmontowany po to, by pokazać, że wielka płyta może być piękna*, dostępne na: <https://architektura.muratorplus.pl/realizacje/ten-budynek-mial-zakonczyc-polefeudalny-sposob-budowania-w-polsce-zobacz-sprzecznica-4-manifest-prefabrykacji-i-technologie-wielkiej-plyty-2-0-aa-9gvm-RoWz-RbpP.html>, (dostęp: 6 marca 2026)
- [19] *Modelowe osiedle Nowe Żerniki we Wrocławiu*, [w:] *Top Builder* 2021, str. 48–49, dostępne na: builderpolska.pl/wp-content/uploads/2021/04/TOP-BUILDER-2021.pdf (dostęp: 6 marca 2026)
- [20] *Pierwszy biurowiec na Nowych Żernikach we Wrocławiu. Prosta forma, naturalne materiały i szczyt architektury* – *Architektura-Murator*, dostępne na: <https://architektura.muratorplus.pl/realizacje/pierwszy-biurowiec-na-nowych-zernikach-we-wroclawiu-prosta-forma-naturalne-materialy-i-szczyt-architektury-aa-Wepv-ncg3-K1MF.html> (dostęp: 19 marca 2026)
- [21] *Biurowiec przy Al. Architektów – Wrocław*, dostępne na: <https://betard.pl/realizacje/biurowiec-przy-alei-architektow-wroclaw> (dostęp: 19 marca 2026)
- [22] *Elewacja biurowca z betonu płukanego przy Al. Architektów we Wrocławiu – Sztuka architektury*, dostępne na: <https://sztuka-architektury.pl/article/17998/elewacja-biurowca-z-betonu-plukanego-przy-al-architektow-we-wroclawiu> (dostęp: 19 marca 2026)
- [23] https://trek.zone/pl/francja/miej-sca/233721/quartiers-modernes-fruges-pessac#google_vignette; (dostęp 14 kwietnia 2026) Informacje o zdjęciach 1. Wikipedia/CC BY-SA 4.0/JosepBC/URL
- [24] Fred Romero, CC BY 2.0/flickr.com (dostęp 14 kwietnia 2026)

Porównanie tradycyjnych i nowoczesnych metod prefabrykacji konstrukcji drewnianych i żelbetowych

Comparison of traditional and modern prefabrication methods for wooden and reinforced concrete structures

dr inż. arch. Justyna Juchimiuk (ORCID: 0000-0003-2934-2349), dr inż. arch. Michał Golański (ORCID: 0009-0009-4836-3197), Instytut Inżynierii Łądowej, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7935

Streszczenie: Artykuł podejmuje próbę krytycznej analizy porównawczej tradycyjnych i nowoczesnych metod prefabrykacji. Zastosowaną metodą badawczą jest studium przypadku obejmujące analizę budynków zrealizowanych w technologii drewnianej (budynek mieszkalny wielorodzinny IBA Hamburg) oraz żelbetowej (akademik Shed Campus Living w Warszawie). Porównanie specyfiki rozwiązań konstrukcyjno-technologicznych charakterystycznych dla obu systemów umożliwiło identyfikację ewolucji paradygmatów prefabrykacji – od analogowych form standaryzacji do zintegrowanych procesów cyfrowej fabrykacji. Wyniki badań wskazują na pełną integrację procesów prefabrykacji konstrukcji z modelowaniem BIM oraz metodami projektowania do wytwarzania i montażu (DfMA).

Słowa kluczowe: prefabrykacja konstrukcji, drewno inżynierskie, konstrukcje żelbetowe, BIM, projektowanie do produkcji i montażu (DFMA).

Abstract: This article presents a critical comparative analysis of traditional and contemporary prefabrication methods. The research methodology is based on case studies of buildings constructed in timber technology (the multi-family residential building at IBA Hamburg) and reinforced concrete (the Shed Campus Living dormitory in Warsaw). The study facilitates a comparison of the structural and technological characteristics specific to both systems and identifies the evolution of prefabrication paradigms – from analogue forms of standardization to integrated digital fabrication processes. The findings indicate the full integration of structural prefabrication processes with Building Information Modeling (BIM) and Design for Manufacturing and Assembly (DfMA) methodologies.

Keywords: structural prefabrication, engineered wood, reinforced concrete structures, BIM, Design for Manufacture and Assembly (DfMA).

1. Wprowadzenie

Współczesna architektura i inżynieria lądowa znajdują się w punkcie zwrotnym, determinowanym przez paradygmaty zrównoważonego rozwoju oraz czwartej rewolucji przemysłowej integrującej nowoczesne technologie cyfrowe z produkcją fizyczną. Prefabrykacja konstrukcji drewnianych i żelbetowych postrzegana dawniej przez pryzmat systemów zamkniętych, ewoluuje w stronę zaawansowanych rozwiązań modułowych i hybrydowych, stanowiąc kluczowy instrument dekarbonizacji sektora budowlanego. Globalny wzrost zainteresowania technologiami off-site wynika z konieczności optymalizacji procesów inwestycyjnych pod kątem redukcji śladu węglowego oraz precyzji wykonawczej, niemożliwej do osiągnięcia w metodach tradycyjnych. W Polsce sektor ten przechodzi intensywną modernizację, stając się istotnym filarem gospodarki.

2. Prefabrykacja konstrukcji drewnianych

Drewno, ze względu na swoją lekkość i łatwość obróbki, było pierwszym materiałem podlegającym procesom prefabrykacji „warsztatowej”. Jak wskazuje Szewczyk, tradycje te sięgają ponad 1300

lat, czego przykładem są japońskie konstrukcje azekura-zukuri czy skandynawskie kościoły klepkowe. Historycznie prefabrykacja drewniana polegała na przygotowaniu elementów konstrukcyjnych poza placem budowy, co pozwalało na „budownictwo szybkościowe” już w XI wieku [1]. Najwcześniejsza udokumentowana implementacja budownictwa prefabrykowanego w ujęciu nowożytnym datuje się na rok 1624, kiedy to angielscy osadnicy przetransportowali na przylądek Cape Ann w Massachusetts drewniany obiekt o zaawansowanej konstrukcji panelowej służący do obsługi operacyjnej floty rybackiej. Ten wczesny przykład budownictwa modułowego zapewniającego możliwość wielokrotnej dekonstrukcji oraz ponownego montażu komponentów stanowi doskonałą egzemplifikację paradygmatu prefabrykacji, polegającego na optymalizacji procesów logistyczno-transportowych oraz adaptacyjności jednostki kubaturowej przy jednoczesnym zachowaniu pełnej integralności strukturalnej i wysokich standardów technicznych [2].

Lekka, drewniana konstrukcja szkieletowa stanowiła pierwszą istotną próbę uprzemysłowienia budownictwa poprzez wprowadzenie standaryzowanych, lekkich słupków ciągłych. Mimo swojej rewolucyjności w XIX wieku system ten charakteryzował się manualnym procesem montażu oraz znacznymi odchyłkami

wymiarowymi, co w kontekście współczesnej inżynierii jest nieakceptowalne [3]. Tradycyjna konstrukcja szkieletowa przeszła w ostatnich dekadach znaczącą ewolucję, stając się fundamentem dla zaawansowanych systemów prefabrykacji panelowej (2D) oraz modułowej (3D). W przeciwieństwie do tradycyjnego wznoszenia konstrukcji na placu budowy (stick-built), nowoczesna prefabrykacja szkieletowa opiera się na wytwarzaniu elementów konstrukcji (modułów, paneli) pozwalającym na integrację warstw izolacyjnych, stolarki otworowej oraz instalacji w kontrolowanych warunkach halowych. Kluczowym czynnikiem optymalizacyjnym jest tu zastosowanie oprogramowania BIM oraz maszyn CNC pozwalających na osiągnięcie tolerancji wymiarowej niemożliwej do uzyskania metodami tradycyjnymi. Z perspektywy zrównoważonego budownictwa, lekki szkielet prefabrykowany charakteryzuje się najniższym śladem węglowym netto wśród analizowanych systemów konstrukcyjnych, co potwierdzają liczne analizy LCA (Life Cycle Assessment) [4]. Implementacja technologii drewna klejonego krzyżowo (CLT) dokonała fundamentalnej redefinicji paradygmatów konstrukcyjnych, odchodząc od ortodoksyjnych, hierarchicznych systemów opartych na elementach liniowych. Dotychczasowe strategie projektowe, bazujące na statycznie wyznaczalnych strukturach prętowych obejmujących słupy, podciąg, nadproża oraz złożone więzary dachowe ustępują miejsca zaawansowanym ustrojom powierzchniowo czynnym. Dzięki ukierunkowanej, warstwowej budowie technologia CLT pozwala na prefabrykację wielkogabarytowych komponentów tarczowo-płytowych o niemal nieograniczonej swobodzie geometrycznej [3]. Kluczową przewagą inżynierską tego materiału jest zniwelowanie naturalnej anizotropii drewna; krzyżowa orientacja lameli zapewnia wysoką sztywność oraz porównywalną wytrzymałość na rozciąganie i ściskanie w obu kierunkach głównych płaszczyzny panelu [4, 5]. Pozwala to na traktowanie przegród budowlanych nie tylko jako osłon, ale jako monolitycznych, współpracujących strukturalnie jednostek, co w procesie projektowania do produkcji i montażu (DfMA) otwiera nowe możliwości w zakresie optymalizacji topologicznej i szybkości montażu struktur lekkich [6]. Współczesna prefabrykacja drewniana, oparta na panelach CLT, redefiniuje tradycyjne standardy dzięki zastosowaniu wieloosiowych centrów obróbkowych CNC. Wykorzystanie modelowania parametrycznego w środowiskach takich jak Grasshopper pozwala na automatyczne generowanie instrukcji produkcyjnych, co umożliwia osiągnięcie tolerancji pasowania na poziomie 0,5 mm. Zastosowanie nieliniowej analizy elementów skończonych (MES) pozwala z kolei na optymalizację parametrów mechanicznych konstrukcji [7].

Pięciokondygnacyjny budynek Woodcube, zrealizowany w ramach IBA Hamburg, to jeden z najbardziej reprezentatywnych przykładów nowoczesnego budownictwa wielokondygnacyjnego z litego drewna (rys. 1). W kontekście prefabrykacji Woodcube reprezentuje innowacyjny system litego drewna (DeepGreen/Holz100), w którym ściany zewnętrzne i stropy

wykonano z warstw drewna iglastego (jodła i świerk) łączonego mechanicznie za pomocą bukowych kołków. Dzięki całkowitemu wyeliminowaniu klejów, gwoździ i chemicznych powłok, elementy te zachowują naturalne właściwości drewna, są paroprzepuszczalne i w pełni nadają się do recyklingu, gdyż poszczególne warstwy mogą być oddzielone w fabryce przy użyciu maszyn CNC. Wysoki stopień prefabrykacji komponentów pozwolił na wzniesienie konstrukcji surowej budynku w zaledwie trzy tygodnie, a cały proces budowy trwał siedem miesięcy (od września 2012 do maja 2013 r.) [8]. Projekt architektoniczny został opracowany przez biuro Architekturstudien ze Stuttgartu, zaś firma Isenmann Ingenieure z Haslach była podmiotem odpowiedzialnym za projekt konstrukcji budynku. Głównym założeniem projektu było stworzenie budynku neutralnego węglowo w całym cyklu życia, niemal w pełni biodegradowalnego oraz wolnego od toksycznych substancji, co pozwoliło zaoszczędzić około 8500 ton emisji



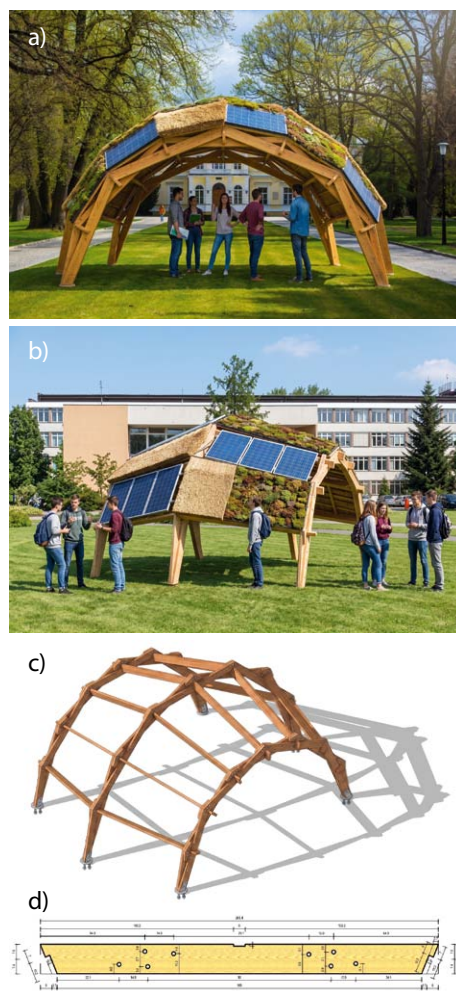
Rys. 1. Budynek Wood Cube, Hamburg: a) widok elewacji zachodniej, b) detal ściany (fot. własne)

dwutlenku węgla w porównaniu do budynków konwencjonalnych. Obiekt mieści 9 lokali mieszkalnych o powierzchni od 70 do 190 m², zapewniając elastyczne układy wnętrz dzięki zastosowaniu dużych rozpiętości stropów i braku wewnętrznych ścian nośnych (poza żelbetowym rdzeniem komunikacyjnym) [8]. Badania w obszarze projektowania i prefabrykacji lekkich konstrukcji drewnianych prowadzone są przez naukowców z Katedry Architektury w Instytucie Inżynierii Lądowej w SGGW w Warszawie. Koncentrują się one na wykorzystaniu metodyki DfMA oraz nowoczesnych technologii komputerowego wspomaganie BIM i projektowania parametrycznego (Grasshopper/Dynamo) w architekturze i budownictwie. W dobranej metodzie badań przez projektowanie (research-by-design) proces tworzenia projektu nie jest jedynie wynikiem końcowym, ale samym narzędziem badawczym. Głównym celem przedsięwzięcia realizowanego we współpracy ze studentkami i studentami kierunku architektura SGGW zrzeszonych w Kole Naukowym Architektury Zrównoważonej „Archi-Eco-Lab” (+ sekcje tematyczne) w ramach konkursu „Kampus SGGW 2030” jest zaprojektowanie i budowa eksperymentalnego pawilonu „Archi-UNI-Green” (rys. 2). Projekt pomyślany jako „pomost pomiędzy tradycją a nowoczesnością” łączy współczesne rozwiązania proekologiczne (prefabrykacja lekkiej konstrukcji drewnianej, dach zielony, panele PV) z tradycyjnym rzemiosłem (połączenia konstrukcji na złącza

ciesielskie, pokrycie strzechą z trzciny). Model drewnianej konstrukcji uwzględniający wszystkie połączenia elementów i sposób montażu został zaprojektowany w środowisku Rhino/Grasshopper oraz Archicad (rys. 2). Struktura pawilonu zainspirowana jest konstrukcjami chińskich mostów tęczowych ze wzajemnie podpartymi, „splcionymi” belkami drewnianymi [9]. Analogiczna zasada umożliwiająca szybki montaż i demontaż konstrukcji została wykorzystana także przez Leonarda da Vinci w koncepcyjnym projekcie mostu wojskowego wykonanym dla rodziny Borgiów [10].

3. Prefabrykacja konstrukcji żelbetowych

Historia prefabrykowanych systemów żelbetowych rozpoczęła się już w czasach rzymskich, kiedy to z materiału przypominającego dzisiejszy beton wytwarzano elementy infrastrukturalne, takie jak części akweduktów i tuneli [11]. Nowoczesna era prefabrykacji betonowej odrodziła się w XIX wieku wraz z opatentowaniem żelbetowych donic przez Josepha Moniera w 1867 roku oraz budową pierwszych belek prefabrykowanych przez firmę Coignet dla kasyna w Biarritz w 1891 roku [12]. Przełomem koncepcyjnym stał się rok 1914, gdy Le Corbusier opracował system Dom-Ino, wprowadzający modułarny szkielet betonowy, który uwalniał pionowe elementy konstrukcyjne od ścian osłonowych i pozwalał na dowolną konfigurację przestrzeni [13]. W 1928 roku miał miejsce kolejny punkt zwrotny, kiedy Eugene Freyssinet opatentował beton sprężony, co fundamentalnie zmieniło naturę tego materiału. Dzięki sprężeniu beton przestał być materiałem pasywnym i podatnym na degradację poprzez pęknięcia, stając się materiałem „aktywnym”, pracującym głównie na ściskanie i charakteryzującym się wyjątkową trwałością. Freyssinet dostrzegał w prefabrykacji nie tylko potencjał techniczny, ale i doniosłą rolę społeczną. Wierzył, że uprzemysłowienie uwolni robotników od ciężkiego wysiłku fizycznego oraz pracy w trudnych warunkach pogodowych na rusztowaniach [14]. Ewolucja prefabrykacji mieszkaniowej w XX wieku przebiegała w trzech wyraźnych etapach. Pierwszy z nich, przypadający na lata 1945–1970, zdominowany był przez systemy zamknięte i wielkopłytowe, szczególnie w Europie Wschodniej. Był to okres



Rys. 2. Studencki pawilon „Archi-Uni-Green” (w ramach konkursu „Kampus SGGW 2030”): a, b) wizualizacja pawilonu w potencjalnych lokalizacjach na kampusie SGGW, c) model 3D drewnianej konstrukcji, d) rysunek wykonawczy (opracowanie własne)

„masowości i euforii”, w którym priorytetem była szybkość budowy i ekonomia, co często odbywało się kosztem architektury. Systemy te narzucały sztywne reguły: wymagały budowy tysięcy identycznych jednostek, stosowania liniowych układów dźwigowych oraz minimalizacji zmienności form, co drastycznie ograniczało elastyczność projektową [15]. Drugi okres (lata 1970–1985) przyniósł przejście w stronę „prefabrykacji otwartej”, oferującej kompatybilne komponenty, które można było dostosować do indywidualnych potrzeb projektantów i użytkowników. Od 1985 roku rozwija się tzw. „prefabrykacja subtelna”, oparta na wysokiej automatyzacji i produkcji zindywidualizowanych elementów, co upodabnia budownictwo do zaawansowanego przemysłu motoryzacyjnego. Budownictwo uprzemysłowione w tym okresie opierało się na zaawansowanych systemach prefabrykacji żelbetowej, które ewoluowały od prostych konstrukcji wielkoblokowych do złożonych systemów panelowych i szkieletowych [16]. W polskim budownictwie pierwszym znaczącym etapem tej ewolucji był system wielkoblokowy Ż, w szczególności tzw. „cegła żerańska”, wykorzystujący kanałowe bloki ścienne i stropowe [17]. Rozwój technologiczny doprowadził do powstania systemów wielkopłytowych, takich jak OWT-67, W-70 oraz system szczeciński, które zdominowały krajobraz zurbanizowany, oferując znaczną szybkość wznoszenia obiektów oraz powtarzalność elementów [18–20]. W systemie W-70 kluczową innowacją było wprowadzenie siatki modułowej o rozpiętościach do 600 cm, co pozwoliło na większą elastyczność w projektowaniu mieszkań, podczas gdy system szczeciński, mimo mniejszej elastyczności, umożliwiał budowę obiektów o wysokości do 11 kondygnacji z wykorzystaniem prefabrykowanych kablnych sanitarnych [16, 17, 19].

We współczesnej prefabrykacji konstrukcji żelbetowych następuje odejście od wytwarzania elementów w formie płaskich płyt lub paneli na rzecz technologii pozwalających na większą swobodę formy i oszczędność materiału. Druk 3D warstw nieplanarnych i nachylonych umożliwia wznoszenie konstrukcji łukowych oraz struktur wspornikowych bez konieczności stosowania kosztownych podpór. Innowacyjną metodą jest Add-On Printing, czyli hybrydowy proces drukowania dodatkowych elementów strukturalnych (np. żeber wzmacniających zorientowanych zgodnie z przepływem sił) bezpośrednio na istniejących komponentach rdzeniowych, co pozwala na redukcję

masy stropów. Kolejnym przełomem jest technologia wstrzykiwania betonu w materiał nośny, co pozwala na drukowanie swobodnych trajektorii przestrzennych i tworzenie skomplikowanych ram przestrzennych. Badania wskazują również na ogromny potencjał formowania cyfrowego (Digital Casting Systems), takiego jak zrobotyzowane szalowanie ślizgowe (Smart Dynamic Casting) czy zastosowanie ultra-cienkich form z druku 3D. Technologie te rozwiązują klasyczne problemy druku 3D, ułatwiając integrację standardowego zbrojenia i eliminując ryzyko powstawania spoin zimnych. Precyzję i wysoką jakość wykończenia powierzchni zapewniają procesy hybrydowe, łączące osadzanie materiału z cyfrowym frezowaniem i wygładzaniem wykonywanym jeszcze w stanie częściowo utwardzonym [21].

Nowoczesna prefabrykacja żelbetowa oferuje liczne przewagi nad metodami tradycyjnymi, w tym precyzyjną kontrolę jakości w warunkach fabrycznych, możliwość stosowania smukłych przekrojów oraz wysoką odporność na czynniki zewnętrzne. Dzisiejsza prefabrykacja jest ściśle powiązana z najbardziej zaawansowanymi i zrównoważonymi technikami budowlanymi, stanowiąc nieuchronny kierunek rozwoju globalnego mieszkalnictwa. Przykładem wykorzystania najnowocześniejszych rozwiązań technologii prefabrykacji jest 8-kondygnacyjny dom akademicki SHED Campus Living zlokalizowany przy ul. Puławskiej 248 w Warszawie (rys. 3). Prywatny akademik o powierzchni 7500 m² z garażem podziemnym i niezbędną infrastrukturą techniczną, oddany do użytkowania w 2025 roku, jest pierwszą w pełni prefabrykowaną inwestycją w segmencie domów studenckich w Warszawie. Projektantem budynku był architekt Radosław Sojka z zespołem, zaś generalnym wykonawcą firma Pekabex. Technologia prefabrykacji konstrukcji żelbetowej doprowadziła do usprawnienia procesu budowy, skrócenia terminów realizacji projektu i zminimalizowania jego wpływu na środowisko. W ramach projektu powstało 360 pokoi akademickich z częściami wspólnymi, takimi jak kuchnie, jadalnie, pokój odpoczynku, siłownia, sala kinowa. Wybór technologii prefabrykacji pozwolił skrócić okres budowy do 15 miesięcy, sam montaż konstrukcji zajął około 3 miesięcy [22].

4. Ewolucja paradygmatów prefabrykacji od standaryzacji analogowej do cyfrowej fabrykacji

Obserwowana współcześnie transformacja technologii budowlanych odzwierciedla fundamentalne przejście od rzemieślniczej standaryzacji charakterystycznej dla pierwszej i drugiej



Rys. 3. Akademik Shed Campus Living: a) Elewacja z żelbetowych prefabrykatów ściennych, b) zrealizowany budynek (fot. własne)

rewolucji przemysłowej, ku paradygmatowi Przemysłu 4.0. Tradycyjne systemy prefabrykacji dążyły do maksymalizacji powtarzalności elementów w celu redukcji kosztów jednostkowych, co jednak skutkowało znacznym ograniczeniem swobody architektonicznej oraz niską precyzją wykonawczą. Dzięki integracji procesów BIM wspieranej przez koncepcję cyfrowego bliźniaka (Digital Twin) oraz metodologię DfMA możliwa jest masowa personalizacja (Mass Customization) wytwarzania wolumetrycznych elementów konstrukcji [3, 23]. Przeprowadzona analiza porównawcza tradycyjnych i nowoczesnych metod prefabrykacji konstrukcji drewnianych oraz żelbetowych pozwala na sformułowanie kluczowych wniosków w zakresie optymalizacji procesów inwestycyjnych w Polsce. Pełna kontrola nad łańcuchem wartości –

od zaawansowanego projektowania parametrycznego, przez zrobotyzowaną produkcję off-site, aż po precyzyjny montaż – minimalizuje entropię informacyjną i pozwala na pełną implementację standardów BIM [6, 24]. Takie podejście, oparte na metodologii projektowania do produkcji i montażu (DfMA), redukuje ryzyko błędów wykonawczych i optymalizuje koszty w całym cyklu życia obiektu (LCC) [25]. Tradycyjne podejście do projektowania często pomija ograniczenia produkcyjne, co prowadzi do błędów na styku projekt-fabryka [26]. Metodologia projektowania do produkcji i montażu (DfMA) odwraca ten proces, kładąc szczególny nacisk na integrację parametrycznych narzędzi z procesem prefabrykacji. Wprowadzając parametry techniczne maszyn i procesów montażowych bezpośrednio do skryptów projektowych [27]. W rezultacie, nowoczesna prefabrykacja nie jest już synonimem monotonii, lecz precyzyjnym narzędziem inżynierskim, łączącym wymogi zrównoważonego rozwoju z dążeniem do innowacyjności formy architektonicznej [28, 29].

5. Podsumowanie

Transformacja sektora w kierunku „Przemysłu 4.0” implikuje konieczność radykalnej redefinicji profilu kompetencyjnego projektanta. Architekci i inżynierowie projektujący konstrukcję w dobie cyfrowej fabrykacji muszą pełnić rolę „projektantów procesów”, sprawnie operujących w środowisku algorytmicznym (np. Grasshopper, Dynamo). Postuluje się pilną reformę programów nauczania na wydziałach technicznych, kładącą nacisk na synergię między teorią projektowania a technologicznymi uwarunkowaniami produkcji komponentów CLT oraz nowoczesnych prefabrykatów betonowych. Przejście na model

DfMA wymaga od architektów i inżynierów biegłości w narzędziach cyfrowych, których nauczanie na polskich uczelniach wciąż bywa traktowane jako fakultatywne. Mimo oczywistych zalet proces wdrażania zaawansowanej prefabrykacji w Polsce napotyka na bariery, które z punktu widzenia akademickiego wymagają pogłębionej refleksji i systemowych rozwiązań. Historyczne doświadczenia z systemami wielkopłytowymi stworzyły w polskim społeczeństwie uprzedzenia w stosunku do budynków w prefabrykowanej konstrukcji żelbetowej. Prefabrykacja drewniana natomiast wciąż zмага się z mitem niskiej trwałości i łatwopalności, mimo że nowoczesne technologie klejenia drewna (CLT, Glulam) oferują odporność ogniową wyższą niż nieosłonięte konstrukcje stalowe. Zmiana tych postaw wymaga nie tylko działań marketingowych, ale przede wszystkim rzetelnych badań naukowych nad starzeniem się nowoczesnych komponentów prefabrykowanych. W sferze makroekonomicznej niezbędne jest wsparcie legislacyjne, wzorowane na standardach skandynawskich i niemieckich, które promuje budownictwo niskowęglowe. Systemy zamówień publicznych powinny w większym stopniu uwzględniać kryteria zrównoważonego rozwoju (Green Public Procurement), co naturalnie faworyzuje prefabrykację jako metodę o niższym śladzie węglowym i mniejszej materiałochłonności. Standaryzacja protokołów wymiany danych BIM na poziomie krajowym jest warunkiem koniecznym dla zapewnienia interoperacyjności między biurami projektowymi a zakładami prefabrykacji. Ostatnim, lecz kluczowym filarem rekomendacji jest ukierunkowanie badań na paradygmat gospodarki o obiegu zamkniętym (Circular Economy). Przyszłość prefabrykacji, niezależnie od materiału konstrukcyjnego, zależy od wdrożenia strategii projektowania uwzględniającego rozbiórkę (Design for Deconstruction). Wymaga to od polskich jednostek naukowo-badawczych intensyfikacji prac nad systemowymi, modułowymi łącznikami mechanicznymi, które umożliwią niedestrukcyjny demontaż i ponowne wykorzystanie komponentów (re-use). Taka innowacyjność w zakresie detalu architektonicznego i konstrukcyjnego stanie się w nadchodzącej dekadzie standardem decydującym o konkurencyjności polskiej myśli technicznej na rynku międzynarodowym.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Szewczyk J., *Drewno We Współczesnej Architekturze. Część 1. Wstęp Do Architektury Drewnianej*, Builder 265, 2019, str. 28–32, doi:10.5604/01.3001.0013.2853
- [2] Kelly B., *The Prefabrication of Houses: A Study by the Albert Farwell Bemis Foundation of the Prefabrication Industry in the United States*; The MIT Press: Cambridge, MA, 1951, ISBN 978-0-262-11001-3
- [3] Golański M., *Problem Implementacji Drewna w Realizacji Form Swobodnych w Architekturze Początku XXI Wieku*, West Pomeranian University of Technology in Szczecin, 2024
- [4] Szewczyk J., *Drewno We Współczesnej Architekturze. Część 2. Budownictwo Szybkościowe z Drewna*, Builder 2/2019, str. 32–36, doi:10.5604/01.3001.0013.3422
- [5] Paszkowski Z. W., *The Prefabrication of Glued Timber Houses for Residential Construction in Poland*, *Drew. Pr. Nauk. Doniesienia Komun., Wood Res. Pap. Rep. Announc.*, 2025, doi:10.53502/wood-200667
- [6] Golański M., Juchimiuk J., Ogrodnik P., Szulej J., Starzyk A., *Parametric Material Optimization and Structural Performance of Engineered Timber Thin-Shell Structures: Comparative Analysis of Gridshell, Segmented, and Hybrid Systems*, *Materials* 19, 2026, str. 341, doi:https://doi.org/10.3390/ma19020341
- [7] Tian H., Zhang Y. X., *The Influence of Bagasse Fibre and Fly Ash on the Long-Term Properties of Green Cementitious Composites*, *Constr. Build. Mater.*, 111, 2016, str. 237–250, doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.02.103
- [8] Petersen J.-P., Roedel C., *Smart Material House WOODCUBE*, IBA Hamburg GmbH, 2014
- [9] Guo G., Du W., Wang C., Liu H., Uddin N., *The Structural Configuration and Mechanical Performance of a New Cable-Supported Reciprocal Structure*, *Buildings* 15, 2025, art. 1006
- [10] Anastas Y., Rhode-Barbarigos L., Adriaenssens S., *Design-to-Construction Workflow for Cell-Based Pattern Reciprocal Free-Form Structures*, *J. Int. Assoc. Shell Spat. Struct.* 57, 2016, str. 159–176
- [11] Fernández-Ordóñez Hernández D., *Prefabrykacja Betonowa. Lekcje z Przszłości i Postępy w Przyszłości*, *Cement, Wapno, Beton* 22, 2019
- [12] Smith R. E., *Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction*; John Wiley & Sons, 2011
- [13] Adamczewski G., Woyciechowski P. P., *Prefabrykacja – Jakość, Trwałość, Różnorodność; Stowarzyszenie Producentów Betonów*; Warszawa, 2014
- [14] Fernández-Ordóñez Hernández D., *Early Developments of Concrete Prefabrication*. In *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet*, Hordijk D. A., Luković M., Eds.; Springer International Publishing: Cham, 2018, str. 2795–2801, ISBN 978-3-319-59470-5
- [15] Runkiewicz L., Szulc J., Sieczkowski J., *Ewolucja Budownictwa Prefabrykowanego w Polsce*, *Przegląd Budowlany* 10/2020, str. 12–15
- [16] Runkiewicz L.; Szulc J.; Sieczkowski J., *Uprzemysłowione Budownictwo Mieszkaniowe. Dawne i Obecne Wymagania Oraz Oczekiwania*, *Builder* 290, 2021, str. 6–10, doi:10.5604/01.3001.0015.1957
- [17] Popek M., Romik Z., *Konstrukcje budowlane: Podręcznik do nauki zawodu Technik budownictwa*; Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa, 2015, ISBN 978-83-02-15320-4
- [18] Rościszewska H., Cyganecki J., *OWT-67 System konstrukcyjno-technologiczny budownictwa mieszkaniowego*, In *Systemy budownictwa mieszkaniowego*, Bielobradek A., Ed., Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 1974
- [19] Bielobradek A., *Systemy Budownictwa Mieszkaniowego i Ogólnego*, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 1974
- [20] Kłopotowski M., *OW-T. Betonowy Potencjał*, *Archit. Artibus* 1/2009, str. 31–38
- [21] Lowke D., Anton A., Buswell R., Jenny S. E., Flatt R. J., Fritsch E. L., Hack N., Mai I., Popescu M., Kloft H., *Digital Fabrication with Concrete beyond Horizontal Planar Layers*, *Cem. Concr. Res.* 186, 2024, art. 107663, doi:10.1016/j.cemconres.2024.107663
- [22] Moterek B., *Wybudują Duży Akademię Na 380 Łóżek Przy Puławskiej Na Mokotowie*, Available online: <https://www.urbanity.pl/mazowieckie/warszawa/wybuduja-duzy-akademik-na-380-lozek-przy-pulawskiej-na-mokotowie,w24329>
- [23] Cheng Z., Tang S., Liu H., Lei Z., *Digital Technologies in Offsite and Prefabricated Construction: Theories and Applications*, *Buildings* 13, 2023, str. 163, doi:10.3390/buildings13010163
- [24] Chyla T., Adamczewski G., *Aspekty Techniczne Realizacji Budowy z Wykorzystaniem Narzędzi Jakich Oferuje Technologia Oparta o BIM We Współczesnej Prefabrykacji Betonowej*. In *Proceedings of the X Konferencja Dni Betonu. Tradycja i Nowoczesność; Stowarzyszenie Producentów Cementu*, 2018
- [25] Golański M., *Advances in Digital Design and Fabrication of Wooden Architecture*, *Archit. Artibus* 14, 2022, str. 37–54, doi:10.24427/aea-2022-vol14-no4-04
- [26] Gołaszewski J., *Nowoczesna Prefabrykacja Betonowa i Kierunki Jej Rozwoju*, *Materiały Budowlane* 12/2025
- [27] Golański M., Juchimiuk J., Podlasek A., Starzyk A., *Design for Manufacturing and Assembly (DFMA) in Timber Construction: Advancing Energy Efficiency and Climate Neutrality in the Built Environment*, *Energies* 18, 2025, art. 6332, doi:https://doi.org/10.3390/en18236332
- [28] Yuan Z., Sun C., Wang Y., *Design for Manufacture and Assembly-Oriented Parametric Design of Prefabricated Buildings*, *Autom. Constr.* 88, 2018, str. 13–22, doi:10.1016/j.autcon.2017.12.021
- [29] Zhou H., Li X., Li X., *Can the Digital Economy Improve the Level of High-Quality Financial Development? Evidence from China*, *Sustainability* 15, 2023, art. 7451, doi:10.3390/su15097451

Plomba śródmiejska w kontekście historycznej struktury urbanistycznej. Część I

Infill development in the city centre within the context of the historic urban structure. Part I

dr inż. arch. Alicja Kozarzewska (ORCID: 0000-0002-0691-4212), dr inż. arch. Katarzyna Jasińska (ORCID: 0000-0002-0954-0738), mgr inż. arch. Jan Damięcki (ORCID: 0009-0004-5893-9827), Instytut Inżynierii Lądowej, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7936

Streszczenie: Zabudowa plombowa stanowi ważne narzędzie intensyfikacji zagospodarowania śródmieść oraz ograniczania rozlewania się miast. Jej realizacja w historycznej tkance wymaga jednak integracji nowych obiektów z istniejącym kontekstem urbanistycznym i kulturowym. Celem artykułu jest identyfikacja kluczowych zasad projektowania zabudowy plombowej w historycznych strukturach śródmiejskich. Badanie oparto na przeglądzie literatury z lat 2010–2026, na podstawie którego opracowano matrycę oceny obejmującą kryteria urbanistyczne, architektoniczne, funkcjonalne i społeczne umożliwiające standaryzowaną ewaluację stopnia realizacji postulatów literaturowych w praktyce.

Słowa kluczowe: zabudowa plombowa, historyczna tkanka miasta, projektowanie kontekstualne.

Abstract: Urban infill development is an important tool for increasing inner-city density and limiting urban sprawl. However, its implementation within historic urban fabrics requires the integration of new buildings with the existing spatial and cultural context. The aim of this paper is to identify key principles of infill development in historic inner-city structures. The study is based on a literature review from 2010–2026, which enabled the development of an evaluation matrix including urban, architectural, functional, and social criteria, allowing for a standardized evaluation of the degree to which literature-based postulates are implemented in practice

Keywords: urban infill, historic urban fabric, contextual design.

1. Wprowadzenie

Plomby można zdefiniować jako budynki realizowane w istniejącej, zwartej tkance śródmiejskiej, służące uzupełnieniu luki w pierzei i najczęściej sytuowane w bezpośrednim styku z zabudową sąsiednią [1]. Projektowanie zabudowy plombowej w strukturach historycznych śródmieść miast wymaga uwzględnienia kontekstu urbanistycznego, uwarunkowań konserwatorskich oraz realiów inwestycyjnych, co czyni je jednym z najbardziej wymagających obszarów projektowania architektonicznego. Literatura przedmiotu obejmuje zarówno opracowania teoretyczne formułujące postulaty potrzeby dopasowania nowej zabudowy do historycznego kontekstu lub wywołania pomiędzy nimi kontrolowanego kontrastu, jak i liczne studia przypadków opisujące konkretne realizacje. Relacja nowych uzupełnień zabudowy z kontekstem historycznym jest szeroko opisana w literaturze zarówno w ujęciach historycznych, konserwatorskich, jak i urbanistyczno-architektonicznych.

Jednocześnie, mimo rozbudowanego dorobku, ustalenia te rzadziej przyjmują postać ujednoliconych kryteriów pozwalających na porównywalną ocenę stopnia realizacji założeń projektowych w pojedynczych, zrealizowanych projektach. W tym kontekście lukę badawczą można sformułować jako: pomimo dostępności opisów realizacji oraz licznych zaleceń

projektowych, brakuje spójnego podejścia, które pozwalałoby systematycznie weryfikować, w jakim stopniu postulaty literaturowe są osiągalne w praktyce projektowej i realizacyjnej. Celem pracy jest identyfikacja kluczowych zasad projektowania plomb śródmiejskich w kontekście historycznym oraz opracowanie narzędzia analitycznego umożliwiającego standaryzowaną ewaluację stopnia realizacji tych wytycznych w praktyce.

2. Metodyka badań

Metodyka badań objęła przegląd i syntezę literatury krajowej i międzynarodowej z lat 2010–2026 dotyczącej zasad kształtowania zabudowy plombowej. Podstawę materiału źródłowego stanowiły artykuły opublikowane w indeksowanych czasopismach naukowych. Operacjonalizacja zidentyfikowanych w nich kluczowych kryteriów jakości rozwiązań architektoniczno-urbanistycznych posłużyła do opracowania autorskiej matrycy oceny.

3. Przegląd literatury

Kształtowanie nowej zabudowy plombowej w środowisku historycznym jest procesem wieloaspektowym, który w świetle najnowszej literatury przedmiotu wymaga integracji wartości urbanistycznych, architektonicznych, funkcjonalnych oraz społecznych. Plomba architektoniczna nie powinna być postrzegana

jedynie jako element wypełnienia próżni, lecz jako kluczowe narzędzie synergii, gdzie nowa interwencja podnosi wartość całej kompozycji tworząc wartość wyższą niż suma jej części [2]. Poniżej przedstawiono przegląd literatury stanowiący podstawę do opracowania matrycy kryteriów oceny zabudowy plombowej w strukturach historycznych przedstawioną w tabeli 1.

3.1. Kontekst urbanistyczny

W kontekście urbanistycznym nadrzędną zasadą projektową kształtowania zabudowy plombowej jest kontynuacja pierzei oraz utrzymanie historycznej linii zabudowy, co pozwala na domknięcie niekompletnych kwartałów i ochronę tradycyjnego modelu „miejskości” [3]. Literatura wskazuje, że interwencje projektowe powinny nie tylko korygować, ale przede wszystkim wzmacniać tożsamość wizualną obszarów historycznych [4, 5]. Nowy budynek musi stanowić funkcjonalnie i wizualnie powiązaną część całości, szanując tradycyjne wzorce ulic oraz istniejące wycofania [4, 6]. Kluczowym parametrem integracji jest dopasowanie gabarytów i proporcji nowego obiektu do sąsiedztwa [7]. Choć dopuszcza się wprowadzanie dominant przestrzennych, nie powinny one naruszać ogólnego układu kompozycyjnego pierzei [2]. Dopasowanie sylwety budynku i poszanowanie linii dachów (skyline) jest niezbędne dla zachowania harmonii widokowej wnętrza urbanistycznych [8].

3.2. Architektura i forma

Forma architektoniczna współczesnej zabudowy plombowej powinna umożliwiać czytelne ukazanie relacji między przeszłością a teraźniejszością. W literaturze przedmiotu wyróżnia się cztery podstawowe strategie estetyczne kształtowania tej relacji:

- dosłowne powielanie (*literal replication/mimesis*),
- inwencję w ramach stylu (*invention within style/referential approach*),
- odniesienie abstrakcyjne (*abstract reference/differential approach*) oraz,
- świadomą opozycję (*intentional opposition/contrasting approach*) [9].

Pierwsze z wymienionych podejść polega na minimalizowaniu różnic wizualnych między nowym budynkiem a historycznym otoczeniem poprzez naśladowanie form, materiałów i detali elewacji sąsiednich obiektów, co często sprawia, że nowa plomba jest trudna do odróżnienia od oryginału dla przeciętnego odbiorcy [10]. Choć strategia ta bywa krytykowana jako tworząca „fałszywe poczucie historii” lub architektoniczny pastisz [11], badania wskazują, że jest ona najczęściej preferowana przez mieszkańców, ponieważ sprzyja zachowaniu ciągłości wizualnej i tożsamości miejsca [10, 12]. Mniej dosłowną formę relacji z kontekstem stanowi inwencja w ramach stylu, polegająca na projektowaniu nowych elementów w stylistycznym pokrewieństwie z otoczeniem, jednak bez bezpośredniego kopiowania form historycznych. W tym przypadku istniejąca architektura stanowi punkt odniesienia dla twórczej interpretacji zasad kompozycyjnych, co pozwala zachować ciągłość języka architektonicznego przy

jednoczesnym wprowadzeniu nowych rozwiązań [11, 13]. Jeszcze większy stopień autonomii nowej architektury zakłada strategia odniesienia abstrakcyjnego. W tym przypadku projekt nie odtwarza wprost stylu otoczenia, lecz interpretuje jego podstawowe cechy kompozycyjne, takie jak proporcje, rytm elewacji czy gabaryty zabudowy, wykorzystując jednocześnie współczesny język form i technologii [9, 13]. Podejście to wymaga wysokich kompetencji projektowych, ponieważ opiera się na zachowaniu równowagi pomiędzy kompatybilnością z otoczeniem a wyraźnym zaznaczeniem współczesnego charakteru architektury [10]. Najbardziej radykalną strategię stanowi natomiast świadoma opozycja, polegająca na celowym przeciwstawieniu nowej formy istniejącemu kontekstowi poprzez wyraźny kontrast estetyczny [10, 13]. W tym ujęciu różnicowanie stawiane jest ponad kompatybilność z otoczeniem, co ma podkreślać odrębność epok architektonicznych oraz wyrażać „ ducha czasu” [11]. Choć podejście to bywa cenione w środowisku projektowym ze względu na dużą swobodę twórczą, badania dowodzą, że wśród mieszkańców spotyka się ono zazwyczaj z najmniejszą akceptacją estetyczną [10, 12].

Literatura przedmiotu wskazuje, że w przypadku kształtowania zabudowy plombowej w kontekście historycznym coraz częściej odchodzi się od skrajności, dążąc do osiągnięcia harmonii kontekstualnej [11, 14]. Istotną rolę odgrywa zachowanie tzw. „podobieństwa rodzinnego” (family resemblance), polegające na dzieleniu przez nową architekturę podstawowych zasad struktury i proporcji z otaczającą zabudową [11]. W praktyce oznacza to kontynuowanie rytmu pionowych i poziomych podziałów elewacji, zachowanie zbliżonych proporcji otworów okiennych oraz utrzymanie właściwych relacji między powierzchniami pełnymi a przeszkleniami [7, 8]. Równie ważnym elementem jest detal architektoniczny i adekwatność materiałowo-kolorystyczna [2, 7]. Stosowanie materiałów nawiązujących do tradycyjnego budulca, takich jak cegła klinkierowa, tynk czy piaskowiec, sprzyja estetycznemu wtopieniu nowej zabudowy w historyczne tło [1, 2]. Znaczenie ma także odpowiednie kształtowanie dachu. W przypadku sąsiedztwa budynków o dachach spadzistych spójność sylwety ulicy uzyskuje się często poprzez zastosowanie dachów płaskich z wycofaniem ostatniej kondygnacji [1, 3].

3.3. Funkcja i parter

Parter budynku plombowego stanowi strefę kontaktu pomiędzy sferą prywatną a publiczną przestrzenią ulicy. Literatura przedmiotu wskazuje, że ta strefa powinna być aktywna i wielofunkcyjna, aby pozytywnie wpływać na środowisko miejskie [8, 15, 16]. Integracja zróżnicowanych funkcji: usług, handlu oraz instytucji kultury umożliwia racjonalne i ekonomiczne wykorzystanie przestrzeni miejskiej [6, 17]. Jeśli budynki plombowe pełnią funkcje społeczne i kulturowe, mogą działać synergicznie, podnosząc jakość środowiska miejskiego. Ich potencjał miastotwórczy sprzyja ożywianiu „martwych” ulic oraz przeciwdziałaniu depopulacji centrów miast [2, 15]. Aktywizacja pierzei ulicy wzmacnia lokalną gospodarkę i tworzy warunki sprzyjające interakcjom społecznym. Efekt ten

Tabela 1. Matryca oceny zgodności zabudowy plombowej z postulatami literaturowymi w strukturach historycznych

Kryterium	Wskaźniki/pytania operacyjne	Ocena w skali 0-3	Źródło weryfikacji
A. Kontekst urbanistyczny			
Kontynuacja pierzei	Czy budynek utrzymuje linię zabudowy? Czy cofnięcia/wysunięcia są uzasadnione (np. wejście, akcent, wymóg techniczny)?	3 – linia zabudowy utrzymana, odstępstwa tylko punktowe (np. wejście/wnęka); 2 – linia zasadniczo utrzymana, odstępstwa na fragmentach elewacji; 1 – częste/rozszerzone odstępstwa, pierzeja wyraźnie rozchwiana lub przerwana; 0 – brak kontynuacji pierzei.	plan zagospodarowania terenu, zdjęcia/wizja lokalna
Dopasowanie skali i sylwety (w tym dominant) do otoczenia	Czy wysokość gzymsu/kalenicy odpowiada sąsiadnym budynkom? Czy stopniowanie wysokości jest czytelne i zgodne z hierarchią przestrzeni?	3 – gzyms i kalenica w zakresie sąsiedztwa (różnice $\leq 0,5$ kond.), stopniowanie wynika z narożnika/układu ulicy; 2 – różnice wysokości umiarkowane (≤ 1 kond.) lub lokalne, stopniowanie częściowo czytelne; 1 – różnice wysokości duże (> 1 kond.), stopniowanie nieczytelne, linia dachów pierzei zaburzona; 0 – brak dopasowania: różnice wysokości skrajne (≥ 2 kond.), sylweta w konflikcie z pierzeją.	elewacje, przekroje, analiza widokowa, zdjęcia/wizja lokalna, plan miasta
B. Architektura i forma			
Czytelność relacji historia-współczesność	Czy przyjęto czytelny strategię kompozycyjną (harmonia/kontrolowany kontrast)? Czy jest konsekwentna w bryle, materiale i detalu?	3 – strategia czytelna i spójna w 3/3: bryła/materiał/detal; 2 – strategia spójna w 2/3: bryła/materiał/detal; 1 – strategia spójna tylko w 1/3: bryła/materiał/detal lub rozwiązania wyraźnie mieszane; 0 – brak rozpoznawalnej strategii (spójność 0/3) lub sprzeczne decyzje w kluczowych elementach.	opis autorski, elewacje, zdjęcia/wizja lokalna
Odniesienie do historycznego rytmu artykulacji	Czy bryła jest artykułowana zgodnie z kontekstem (podział na segmenty, uskoki, podziały pionowe/poziome)? Czy fasada respektuje układ historycznych osi i rytm otwarc? Czy podziały są czytelne na poziomie parteru i wyższych kondygnacji?	3 – spójność w 3/3: bryła (segmentacja/uskoki)/rytm osi i otwarc fasady/czytelność podziałów na parterze i wyżej; 2 – spójność w 2/3: jeden z elementów (bryła/rytm fasady/czytelność podziałów) jest niespełniony; 1 – spójność tylko w 1/3: nawiązanie fragmentaryczne, bez konsekwencji w pozostałych elementach; 0 – spójność 0/3: brak odniesień do rytmu/osi i brak czytelnej artykulacji zgodnej z kontekstem.	Rzuty, elewacje, zdjęcia/wizja lokalna
Adekwatność materiałowo-kolorystyczna	Czy dobór materiałów wspiera wpisanie w kontekst (faktura, kolor)?	3 – faktura/materiał oraz kolorystyka mieszczą się w paletcie i charakterze otoczenia; 2 – faktura/materiał lub kolorystyka częściowo odbiega od palety i charakteru otoczenia; 1 – oba elementy wyraźnie odbiegają od otoczenia lub występują dysonanse materiałowe; 0 – brak adekwatności: materiały i kolorystyka zasadniczo sprzeczne z charakterem miejsca (dominujący kontrast bez uzasadnienia).	elewacje, detale, zdjęcia/wizja lokalna
Jakość i złożoność detalu	Czy detale (obramienia, gzymsy, loggie/balkony, balustrady) budują skalę i czytelność fasady?	3 – detal czytelny w skali ulicy oraz spójny na elewacji (parter-kondygnacje-zwieńczenie); 2 – detal w większości wspiera skalę i czytelność fasady; 1 – detal nie odpowiada skali przestrzeni ani nie jest spójny, występuje przypadkowość; 0 – brak detalu (praktycznie nieobecny) albo detal w wyraźnym konflikcie z kompozycją fasady.	elewacje, detale, zdjęcia/wizja lokalna
Dopasowanie formy dachu	Czy forma dachu uwzględnia krzywą widokową (połacie/attyki/lukarny/urządzenia techniczne)? Czy instalacje są widoczne z poziomu ulicy wkomponowane?	3 – forma dachu zgodna z ekspozycją; instalacje niewidoczne lub wkomponowane; 2 – zgodność częściowa: dach zasadniczo adekwatny, ale instalacje miejscami widoczne albo instalacje ukryte, lecz forma dachu słabiej dopasowana; 1 – dach nie odpowiada ekspozycji i/lub instalacje wyraźnie widoczne; 0 – dach nieadekwatny względem sąsiedztwa, instalacje istotnie zakłócają sylwetę.	przekroje, widoki, rzut dachu, zdjęcia/wizja lokalna
C. Funkcja i parter			
Parter a przestrzeń publiczną	Czy parter ma funkcje aktywizujące (usługi/wejścia/witryny)? Czy jest czytelny i dostępny?	3 – na elewacji dominują witryny i wejścia, brak barier architektonicznych; 2 – częściowa aktywność parteru i/lub dostępność zapewniona, ale z lokalnymi ograniczeniami 1 – aktywność parteru marginalna i/lub istotne bariery dostępności 0 – parter zamknięty na ulicę.	rzut parteru, elewacje, zdjęcia
Czytelność wejść	Czy wejście jest jednoznaczne, powiązane z ulicą i czytelne w kompozycji fasady?	3 – wejście jednoznaczne i czytelnie powiązane z przestrzenią publiczną; 2 – wejście czytelne, ale powiązane z ulicą pośrednio, orientacja możliwa bez trudności; 1 – wejście słabo czytelne, orientacja utrudniona. 0 – wejście trudne do odnalezienia, brak powiązania z przestrzenią publiczną.	elewacje, rzut parteru, zdjęcia

Kryterium	Wskaźniki/pytania operacyjne	Ocena w skali 0-3	Źródło weryfikacji
D. Wymiar ludzki i emocjonalny			
Wartość dziedzina jako przestrzeni wspólnej	Czy dziedziniec jest użytkowy (zielen, mała architektura), dostępny i poprawia warunki pierwotnie zastane?	3 – dziedziniec dostępny, o wysokich walorach użytkowych (zielen/mała architektura); 2 – dziedziniec dostępny, o niższych walorach użytkowych; 1 – dziedziniec z ograniczonym dostępem, o niskich walorach użytkowych; 0 – brak dziedzinca jako przestrzeni wspólnej (przestrzeń niedostępna/techniczna).	plan zagospodarowania terenu, archiwalny plan miasta, zdjęcia, opis autorski
Zintegrowanie z kwartałem	Czy rozwiązania wzmacniają relacje z ulicą i kwartałem (przejścia, ogrodzenia, dostęp)?	3 – czytelne i ciągle powiązania piesze wpisane w istniejącą siatkę, bez grodzień i barier; 2 – powiązania piesze mniej czytelne, powiązanie z siatką istnieje, lecz nie jest pełne, brak grodzień; 1 – powiązania piesze fragmentaryczne (lokalne, nieciągłe), słabe włączenie w istniejącą siatkę, grodzień nie są dominujące; 0 – izolacja (grodzień/brak przejść), brak powiązań i dostępności w skali kwartału.	analiza ogrodzeń/przejść, wizja lokalna, rzut parteru
Partycypacja użytkowników i genius loci	Czy rozwiązania uwzględniają kulturowe znaczenie miejsca i to, jak ludzie je postrzegają? Czy prowadzono konsultacje społeczne lub analizę potrzeb?	3 – podtrzymane znaczenia kulturowe miejsca, a rozwiązania odpowiadają na lokalne potrzeby, udokumentowane konsultacje lub analiza potrzeb; 2 – spełnienie w niepełnym zakresie podtrzymania znaczenia kulturowego miejsca lub zrealizowania rozwiązań odpowiadających na lokalne potrzeby; 1 – podtrzymanie znaczeń miejsca i/lub odpowiedź na potrzeby lokalne zrealizowane w niewielkim stopniu; 0 – brak odniesień do znaczeń miejsca i brak uwzględnienia potrzeb użytkowników.	dokumentacja konsultacji/uzgodnień, wizja lokalna, prasa lokalna i media
Inkluzywność i różnorodność użytkowników	Czy projekt tworzy miejsca sprzyjające interakcjom (ławki, zielen, mikroprzestrzenie, przejścia)? Czy zaprojektowano zróżnicowane typy mieszkań? Czy są mechanizmy wspierające dostępność ekonomiczną?	3 – spełnione 3/3: miejsca sprzyjające interakcjom/zróżnicowane typy mieszkań/mechanizmy lub dostępności ekonomicznej; 2 – spełnione 2/3: jeden z elementów (interakcje/różnorodność mieszkań/dostępność ekonomiczna) nieobecny lub ograniczony. 1 – spełnione 1/3: tylko jeden element spełniony; pozostałe nieobecne lub marginalne. 0 – spełnione 0/3: brak rozwiązań sprzyjających interakcjom, brak zróżnicowania mieszkań i brak przesłanek dostępności ekonomicznej.	plan zagospodarowania terenu, rzuty kondygnacji, zestawienie mieszkań, informacje z biura sprzedaży

Opis: Skala oceny każdej kategorii: 0–3. Dopuszcza się oznaczenie „n/d” (nie dotyczy) dla kryteriów nieadekwatnych do danego przypadku

można osiągnąć poprzez stosowanie transparentnych elementów, takich jak duże przeszklenia, oraz wyraźnie zarysowane wejścia, które inicjują dialog między budynkiem a jego otoczeniem [6, 17].

Funkcja parterów pozostaje również w ścisłym związku z bezpieczeństwem przestrzeni ulicznej. Zasada naturalnej obserwacji, określana jako „oczy na ulicy”, zakłada, że sytuowanie wejść i okien od strony przestrzeni publicznej podnosi poziom bezpieczeństwa dzięki stałej, nieformalnej kontroli społecznej [18]. W konsekwencji wzmacnia to poczucie przynależności oraz bezpieczeństwa mieszkańców [5].

3.4. Wymiar ludzki i emocjonalny

Poza wprowadzaniem funkcji aktywizujących pozytywny odbiór zabudowy plombowej przez mieszkańców zależy od stopnia, w jakim odpowiada ona na lokalne oczekiwania. Otwarte dziedzińce i przestrzenie półpubliczne odgrywają istotną rolę w budowaniu relacji społecznych w gęstej strukturze miejskiej. [6, 16, 17]. Umożliwiają one różnorodne formy użytkowania, od kina plenerowego po spotkania sąsiedzkiej społeczności, wzmacniając więzi oraz poprawiając jakość życia w centrach miast [15, 17].

Projektowanie w kontekście historycznym wymaga uwzględnienia przywiązania mieszkańców do miejsca. Nowe realizacje nie muszą zaburzać dotychczasowego odbioru miejsca,

jeśli odpowiadają na potrzeby społeczno-kulturowe mieszkańców i respektują genius loci [6, 11, 13]. Podtrzymanie ciągłości charakteru miejsca wzmacnia relację człowiek-miejsce [11, 19]. Dostosowanie formy architektonicznej nowej zabudowy do tkanki historycznej sprzyja pozytywnemu postrzeganiu inwestycji oraz umacnia poczucie tożsamości mieszkańców [17].

Udział lokalnej społeczności w procesie projektowym i decyzyjnym jest kluczowy dla jakości i społecznej akceptacji rozwiązań projektów plombowych [20, 21]. Mieszkańcy często preferują rozwiązania zapewniające podtrzymanie i niezmienną tożsamość miejsca „spirit of place”, np. poprzez nawiązania do tradycyjnych elementów architektonicznych [10, 11]. W literaturze przedmiotu wciąż widoczna jest dyskusja między zwolennikami dosłownej rekonstrukcji historycznej a podejściem opartym na współczesnej interpretacji architektonicznej [10, 12].

Partycypacja społeczna jest podstawą tworzenia sprawiedliwych i zróżnicowanych miast, badania podkreślają, że w przeszłości głos mieszkańców był często pomijany, co negatywnie wpływało na ochronę dziedzictwa [14, 22]. Wprowadzanie różnorodnych funkcji, w tym mieszkań dla różnych grup wiekowych i dochodowych oraz dostosowywanie infrastruktury dla osób z niepełnosprawnościami oraz innych grup o szczególnych potrzebach sprzyja utrzymaniu stabilnej, aktywnej i różnorodnej populacji miejskiej [5, 15, 18].

W rezultacie budynek plombowy nie powinien być traktowany wyłącznie jako uzupełnienie luki w pierzei, lecz jako narzędzie kształtowania jakości życia w mieście. Prawidłowe wpisanie obiektu w kontekst urbanistyczny, poszanowanie istniejącej architektury historycznej, aktywny parter, czytelna relacja wnętrze-ulica, przestrzenie półpubliczne oraz wrażliwość na kontekst historyczny i społeczne oczekiwania sprzyjają tworzeniu zabudowy, która zostanie zaakceptowana przez mieszkańców miasta.

4. Matryca oceny

Zaprezentowana w tabeli 1 matryca stanowi syntetyczne ujęcie wniosków z przeglądu literatury, kategoryzując kryteria oceny w czterech głównych obszarach. Ewaluacja poszczególnych wskaźników opiera się na czterostopniowej skali (od 0 do 3). Wartość najwyższa (3) oznacza pełną zgodność rozwiązań projektowych z postulatami teoretycznymi, z kolei ocena najniższa (0) wskazuje na ich całkowity brak lub rozwiązania stojące w rażącej sprzeczności z historycznym charakterem otoczenia. Narzędzie pozwala na wystandaryzowane profilowanie inwestycji, umożliwiając badaczom systematyczną i porównywalną ocenę stopnia integracji nowej zabudowy plombowej z istniejącą tkanką miejską.

5. Podsumowanie

Wprowadzanie zabudowy plombowej coraz częściej uznaje się za kluczową strategię pozwalającą ograniczać rozlewanie się miast oraz zwiększać efektywność wykorzystania istniejącej infrastruktury technicznej. Prawidłowość wprowadzenia zabudowy uzupełniającej nie zależy wyłącznie od zwiększenia intensywności zabudowy, wymaga ona integracji z istniejącą tkanką miejską w wymiarze przestrzennym. Wymagane jest jednocześnie wpisanie się w kontekst urbanistyczny i poszanowanie genius loci, odpowiedniość formy architektonicznej, wykreowanie aktywnej funkcji parteru oraz pozyskanie akceptacji społecznej. Oznacza to potrzebę równoważenia współczesnych standardów zabudowy z historycznym kontekstem oraz oczekiwaniami mieszkańców. Przyszłe projekty plombowe powinny koncentrować się na projektowaniu zorientowanym na użytkownika, tak aby wzmacniały społeczną i kulturową tożsamość przestrzeni.

Należy podkreślić, że przedstawione w artykule wyniki mają charakter teoretyczny. Dalsze badania powinny obejmować przetestowanie matrycy i rozpoznanie w jakim stopniu zasady projektowania zabudowy plombowej w kontekście historycznym, formułowane w literaturze, są osiągalne w praktyce projektowej i realizacyjnej oraz jakie kompromisy i czynniki je determinują. Uzupełniając istotne jest rozpoznanie, które elementy kompozycji urbanistyczno-architektonicznej są najczęściej zachowywane w celu utrzymania spójności pierzei, a które ulegają odstępstwom względem kontekstu historycznego.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Grzybowski A., Budynki plombowe w zabudowie śródmiejskiej jako element rewitalizacji miast górnośląskich. Część 2., *Builder* 2/2022, doi: 10.5604/01.3001.0015.6951
- [2] Gleń P., Szostak B., Plomba w zabudowie – element scalający, *Budownictwo i Architektura* 16, 1/2017, doi: 10.24358/Bud-Arch_17_161_07
- [3] Krajewska J., Uzupełnienia zabudowy pierzejowej w śródmiejskiej dzielnicy Olbin we Wrocławiu po 2000 roku, *Builder* 7/2023, doi: 10.5604/01.3001.0053.7201
- [4] Al Hasany H. H. S., Urban Infill Processes and Their Role in Achieving the Main Objectives within the Old Urban Fabric, *Journal of Engineering and Architecture* 6, 2/2018, doi: 10.15640/jns.v6n2a3
- [5] AlHasawi M., Maatouk M. M. H., Qurunfulah E., Key Success Factors of Urban Infill Development: A Conceptual Framework, *European Journal of Architecture and Urban Planning* 3, 3/2024, doi: 10.24018/ejarch.2024.3.3.40
- [6] Abdelsalam T., New architectural intervention in historically sensitive contexts: humanistic approach in historic Cairo, *HBRC Journal* 17, 1/2021, doi: 10.1080/16874048.2020.1863745
- [7] Hu Y., Heath T., Tang Y., Zhang Q., Using quantitative analysis to assess the appropriateness of infill buildings in historic settings, *Journal of Architectural and Planning Research* 34, 2/2017, str. 91–113
- [8] Rahmat F., Yuli N. G., Maharika I. F., Infill Architecture: Contextualizing Reviews 5, 2/2022, str. 1–17
- [9] Semes W., *The Future of the Past: A Conservation Ethic for Architecture, Urbanism, and Historic Preservation*, W.W. Norton & Company, 2009
- [10] Sotoudeh H., Wan Mohd Zakri Wan Abdullah, Evaluation of fitness of design in urban historical context: From the perspectives of residents, *Frontiers of Architectural Research* 2/2013, doi: 10.1016/j.foar.2012.10.007
- [11] Zamri M. A. H., Rasidi M. H., Majid R. A., The Contextual Design Criteria of Infill Building Façade in Malaysian Urban Historic Districts: A Systematic Review, *International Journal of Sustainable Development and Planning* 18, 5/2023, doi: 10.18280/ijstdp.180517
- [12] Abdel-Kader Z. F., Infill Design in Heritage Sites Study of Experts' Preferences and Attitudes, *Journal of Engineering and Applied Science* 66, 4/2019, str. 451–463
- [13] Demiri K., New Architecture as Infill in Historical Context, *Architecture and Urban Planning* 7/2013, doi: 10.7250/aup.2013.005
- [14] Milojković A., Antić U., Stanojević A., Jevremović L., Nikolić M., Đorđević I., Brzaković M., Perception of Authenticity of a UNESCO Heritage Site: New Infill Design and Integrity Protection in the Old Town of Ohrid, North Macedonia, *Sustainability* 17, 5/2025, doi: 10.3390/su17052067
- [15] Gil-Mastalerczyk J., Jańczy-Pawlikowska L., Multifunkcjonalność zabudowy plombowej sposobem na racjonalne i ekonomiczne wykorzystanie przestrzeni, *Materiały Budowlane* 10/2023, doi: 10.15199/33.2023.10.06
- [16] Nadolny A., Zabudowa uzupełniająca jako element kompozycji miejskiego środowiska zamieszkania w planach urbanistycznych Poznania w drugiej połowie XX wieku, *Czasopismo Techniczne Architektura* 6/2010, str. 92–98
- [17] Al-Abide Z. M., Al-Dabbagh J. A., Mohammed Qasim Al-Ani, Infilling and Architectural Addition and Its Effect on the Integration of the Contemporary City Townscape, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, tom 870, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/870/1/012047
- [18] Aly S., Attwa A., Infill development as a catalyst for urban regeneration, *WIT Transactions on Ecology and The Environment*, tom 173, 2013, str. 455–466
- [19] Imam S., Assessment and review of infill designs' guidelines for residential urban conservation areas, *Int. Journal for Housing Science* 37, 3/2013, str. 137–149
- [20] Choi J., Understanding the Role of Processes in Shaping the Compatibility of Contemporary Architecture in Historical Urban Environments, *Buildings* 15, 2/2025, doi: 10.3390/buildings15020247
- [21] Farshchin A., Ramezani R., Understanding the conceptual and procedural framework of urban infill development, *Capacity Development and Capacity Building in the Public Sector* 61, 3/2005, str. 407–422
- [22] Bröchner J., Gregorowicz-Kipszak J., Gustafsson M., Hagson A., Accelerated planning for urban housing infills: coordination strategies, *European Planning Studies*, 2020, doi: 10.1080/09654313.2020.1817866

Analiza numeryczna bezpieczeństwa geotechnicznego składowiska odpadów projektowanego w warunkach podłoża słabonośnego

Numerical analysis of the geotechnical safety of a waste landfill designed in conditions of weak subsoil

prof. dr hab. inż. Eugeniusz Koda (ORCID: 0000-0002-3895-960X), dr inż. Marek Bajda (ORCID: 0000-0002-3921-2268), mgr inż. Wiktor Sitek (ORCID: 0009-0009-2091-3708), dr inż. Mariusz Lech (ORCID: 0000-0003-1617-6361), dr inż. Zdzisław Skutnik (ORCID: 0000-0003-3228-4936), dr inż. Piotr Osiński (ORCID: 0000-0003-1503-7650), Instytut Inżynierii Lądowej, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7937

Streszczenie: Dobór sposobu posadowienia obiektów inżynierskich w trudnych warunkach geotechnicznych wymaga szczególnej analizy warunków gruntowych, przede wszystkim w zakresie interpretacji parametrów geotechnicznych. Składowiska odpadów zaliczane są do nietypowych obiektów inżynierskich, ich projektowanie wymaga zatem stosowania bardziej zaawansowanego podejścia analitycznego. W artykule przedstawiono analizę numeryczną metodą elementów skończonych zachowania się składowiska odpadów oraz podłoża gruntowego w związku z planowaną rozbudową obszaru składowania. Zakres analiz obejmuje ocenę bezpieczeństwa geotechnicznego, w tym analizę stateczności skarp oraz przemieszczeń projektowanego wykopu i nasypów otaczających strefę przyszłego składowania odpadów komunalnych. W analizach uwzględniono również proponowane metody wzmocnienia podłoża, takie jak kolumny wykonywane metodą wymiany dynamicznej (DR) oraz kolumny żwirowe (SC), prefabrykowane dreny pionowe (PVD) oraz warstwy geosyntetyczne, aby spełnić wymagania bezpieczeństwa geotechnicznego.

Słowa kluczowe: składowisko, wzmocnienia podłoża, geowłókny, geotechnika środowiskowa, modelowanie numeryczne.

Abstract: The selection of the method of foundation of engineering structures in difficult geotechnical conditions requires a special analysis of the ground conditions, primarily in terms of the interpretation of the geotechnical parameters. Waste landfills are classified as atypical engineering facilities, so their design requires a more advanced analytical approach. The article presents a numerical analysis using the finite element method of the behavior of a waste landfill and the subsoil in connection with the planned expansion of the landfill area. The scope of the analyzes includes the assessment of geotechnical safety, including analysis of slope stability and displacements of the planned excavation and embankments surrounding the future municipal waste storage zone. The analyzes also took into account the proposed methods of strengthening the ground, such as columns made using the dynamic replacement method (DR) and gravel columns (SC), prefabricated vertical drains (PVD) and geosynthetic layers to meet the geotechnical safety requirements.

Keywords: landfill, ground reinforcement, geotextiles, environmental geotechnics, numerical modeling.

1. Wprowadzenie

Projektowanie oraz eksploatacja składowisk odpadów komunalnych w dalszym ciągu stanowi istotne wyzwanie geotechniczne w skali globalnej. Wynika to przede wszystkim z niejednorodnej struktury materiałów odpadowych, wymagających metod składowania odpadów i konstrukcji składowisk oraz potencjalnego występowania znacznych odkształceń, które mogą prowadzić do poważnych uszkodzeń systemów uszczelniających podłoże oraz warstw przykrycia, co może doprowadzić do utraty stateczności całej konstrukcji. W kontekście

europejskim normą Eurokod 7 (EC7) jednoznacznie wskazuje, że konstrukcje geotechniczne kategorii 3, do których zaliczane są składowiska, wymagają zastosowania rygorystycznych metod projektowych. Takie podejście jest niezbędne w celu zapewnienia bezpieczeństwa zarówno w analizach stanów granicznych nośności, jak i użyteczności, zarówno w fazie budowy, jak i w okresie eksploatacji. Tradycyjne metody formowania nasypów na gruntach słabonośnych lub innych podłożach o ograniczonej nośności często skutkują nadmiernymi osiadaniem i przekroczeniem stanów granicznych, co w praktyce uzasadnia stosowanie technologii wzmacniania podłoża

gruntowego w celu zwiększenia jego nośności oraz ograniczenia przemieszczeń pionowych i poziomych [2].

Jednym z najbardziej efektywnych i powszechnie stosowanych rozwiązań w zakresie wzmocniania gruntów słabonośnych jest metoda dynamicznej wymiany (*Dynamic Replacement* – DR), polegająca na instalacji kolumn kamiennych do głębokości maksymalnie 6 m, które wypierają grunty drobnoziarniste, zastępując je zagęszczonymi kolumnami gruntu o właściwościach wytrzymałościowych zbliżonych do gruntu nośnego. Alternatywnie, możliwe jest zastosowanie kolumn żwirowych z wibrowymianą (*Stone Columns* – SC). Kolumny te istotnie zwiększają sztywność podłoża, poprawiają jego właściwości drenażowe, przyspieszają proces konsolidacji i niwelują nadmierne osiadania. W ekstremalnie trudnych warunkach gruntowych stosuje się również prefabrykowane dreny pionowe (*Prefabricated Vertical Drains* – PVD), które uzupełniają wzmocnienia kolumnowe, przyspieszając rozpraszanie ciśnienia wody w porach i tym samym osiadanie gruntów spoistych. Opracowania naukowe dostępne w literaturze wykazują, że zastosowanie kombinacji PVD i kolumn kamiennych może skrócić czas konsolidacji nawet o 70% w porównaniu z gruntami, gdzie wzmocnienia nie były stosowane [4]. Uzupełnieniem rozwiązań mających na celu poprawę warunków nośnych podłoża może być zastosowanie geosyntetyków, ponieważ w warstwach zbrojenia geosyntetycznego następuje zarówno równomierne rozłożenie obciążeń, jak i zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie w potencjalnych płaszczyznach poślizgu.

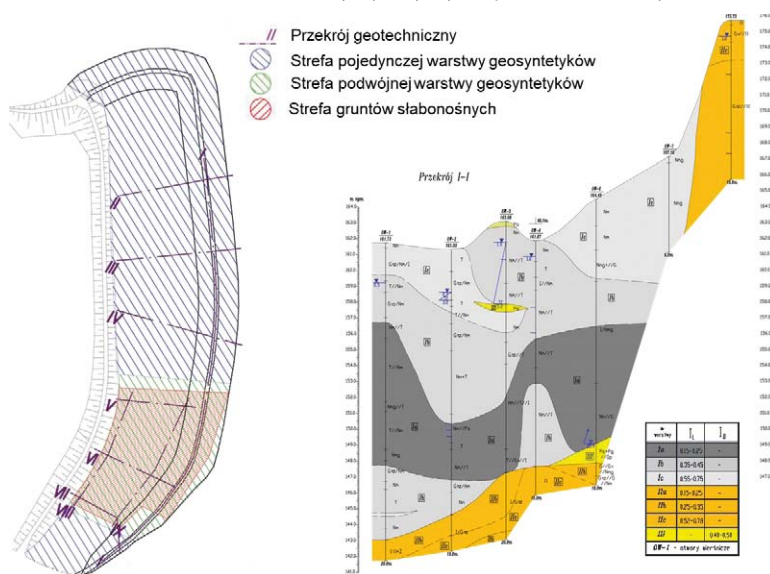
Kluczowym wyzwaniem w analizie stateczności oraz nośności i ocenie bezpieczeństwa geotechnicznego w tak wymagających konstrukcjach, jak składowiska, jest właściwa identyfikacja i określenie parametrów gruntu oraz materiału odpadowego, a następnie zastosowanie odpowiedniego podejścia obliczeniowego w celu określenia warunków stanów granicznych. Doświadczenie inżynierskie i przegląd literatury wskazują, że metoda redukcji wytrzymałości na ścinanie (*Shear Strength Reduction* – SSR) [3] stosowana w modelowaniu metodą elementów skończonych MES, z wykorzystaniem takich programów jak PLAXIS 2D, zapewnia skuteczny i wiarygodny mechanizm oceny stateczności skarp. Procedura SSR polega na stopniowym zmniejszaniu wartości parametrów wytrzymałości na ścinanie gruntu i materiału odpadowego aż do momentu wystąpienia globalnej utraty stateczności. Podejście to pozwala w sposób bardziej realistyczny odwzorować złożoną geometrię skarp oraz zróżnicowanie wytrzymałości materiałów w porównaniu do klasycznych metod równowagi granicznej, szczególnie w przypadku zastosowania wzmocnień i obciążeń

występujących na różnych etapach realizacji robót. W literaturze opublikowano również przykłady efektywnego wykorzystania metody SSR w obliczeniach geotechnicznych składowisk, w tym do oceny skuteczności geomembran, optymalizacji rozstawu kolumn oraz właściwości zastosowanych rozwiązań poprawy warunków nośności podłoża [6].

Mając na uwadze powyższe, niniejsza publikacja prezentuje przykład modelowania oraz analizę podejścia zastosowanego w sytuacji, w której istniejące składowisko położone w wymagających warunkach gruntowych zostało przeprojektowane w celu zwiększenia jego pojemności. Poprzez przedstawienie wyników badań terenowych, omówienie założeń modelu geotechnicznego, doboru parametrów oraz interpretacji uzyskanych rezultatów, artykuł przedstawia kompleksową realizację procesu modelowania – od charakterystyki podłoża i materiałów odpadowych, poprzez obliczenia numeryczne i analizy wyników modelowych, aż po sformułowanie zoptymalizowanych zaleceń projektowych.

2. Metodologia

Składowisko odpadów zlokalizowane jest na obszarze dawnego, zrekultywowanego wyrobiska gliny. Podłoże budują heterogeniczne osady fluwioglacjalne, reprezentowane przez piaski i żwiry, przewarstwione pyłami i łąłami, z lokalnymi nagromadzeniami gruntów organicznych. Naturalne zwierciadło wód gruntowych występuje w piaskach trzeciorzędowych na głębokości od 4 do 7 m poniżej istniejącej powierzchni terenu. Napięte zwierciadło wód gruntowych nawiercono w warstwie łąłów o niskiej przepuszczalności, które zalegają do głębokości około 15 m. Mapę z lokalizacją przekrojów wraz z przykładowym przekrojem geotechnicznym przedstawiono na rysunku 1. Badania terenowe obejmowały sondowania statyczne CPTu (*Cone Penetration Test*) oraz badania sondą krzyżakową FVT (*Field Vane Test*), które umożliwiły uzyskanie ciągłych profili stopnia zagęszczenia, wytrzymałości na ścinanie z odpływem oraz charakterystyk dyssypacji ciśnienia wody w porach.



Rys. 1. Poglądowa mapa lokalizacji przekrojów obliczeniowych wraz z przykładowym przekrojem geotechnicznym w strefie planowanego składowiska

Badania laboratoryjne przeprowadzone na próbkach o strukturze naruszonej i nienaruszonej pozwoliły określić parametry wytrzymałościowe w warunkach bez i z odpływem, współczynniki konsolidacji oraz wartości współczynnika filtracji. Uzyskane parametry zostały następnie wykorzystane jako dane wejściowe w modelach numerycznych. Należy jednak pamiętać, iż wiarygodność uzyskanych wyników zależy od poprawnie przyjętych parametrów geotechnicznych odpadów, które stanowią materiał bardzo niejednorodny i trudny do jednoznacznej interpretacji. W opracowaniu modeli obliczeniowych zastosowano trzy warianty rozwiązań wzmocnienia podłoża słabonośnego rozpoznanego na podstawie badań terenowych oraz laboratoryjnych. Podłoże słabonośne zostało zdefiniowane dla stref, w których grunty charakteryzują się wartościami modułu ścisłości < 12 MPa oraz wytrzymałością na ścinanie < 50 kPa.

Warianty analiz numerycznych przemieszczeń i stateczności obejmowały zaprojektowanie w podłożu kombinacji kolumn DR i SC, pionowych drenów prefabrykowanych PVD oraz warstw geosyntetycznych, rozmieszczonych w dwóch konfiguracjach (warstwy podwójnej i pojedynczej). Kolumny DR o średnicy 0,6 m zaprojektowane na głębokość od 4,5 do 6,0 m (lub w przypadku kolumn SC do 15 m), przy rozstawie w siatce 7 m dla konfiguracji początkowej. Prefabrykowane dreny pionowe o nominalnej średnicy rdzenia 10 mm oraz efektywnej grubości drenażowej 75 mm instalowano w gęstszej siatce o rozstawie 1,77 m w celu przyspieszenia dyssypacji nadciśnienia wody w porach. Wzmocnienie geosyntetyczne stanowiły geosiatki dwuosiowe o wytrzymałości na rozciąganie wynoszącej 1000 kN/m. Zastosowano je w postaci pojedynczej warstwy pod nasypem dociążającym składowisko lub jako układ dwóch warstw w obrębie wykopu przeznaczanego pod docelową lokalizację składowiska. Parametry materiałowe nawierconych w profilu gruntów oraz elementów wzmocnienia przedstawione zostały w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry materiałów zastosowanych do obliczeń numerycznych

Rodzaj materiału	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	φ' (°)	M (MPa)
Grunty spoiste	19.0	5	12	12
Grunty niespoiste	17.5	-	29	24
Nasyp	18.0	-	33	70
Odpady	15.0	25	22	8
Kolumny (DR and SC)	18.0	-	33	170

Odzwierciedlają one konserwatywne wartości uzyskane na podstawie badań laboratoryjnych oraz danych producentów. Parametry mechaniczne odpadów przyjęto na podstawie charakterystyki materiału deponowanego w przeszłości. Głównym wyzwaniem projektowym były nawiercone na całej powierzchni niecki planowanego składowiska warstwy gruntów spoistych o niskich parametrach mechanicznych i odkształceniowych, wymagających wzmocnienia. Obliczenia przeprowadzone

na potrzeby weryfikacji stanów granicznych dla 3 wariantów wzmocnienia podłoża gruntowego wykonane zostały metodą elementów skończonych (MES) przy założeniu płaskiego stanu odkształcenia gruntu (*plane strain*) [5]. Takie rozwiązanie charakteryzują jednak pewne ograniczenia w interpretacji, ponieważ model zakłada nieskończoność układu w kierunku podłużnym, ustalając odkształcenia w danym kierunku jako wartości zerowe, co może prowadzić do bardziej konserwatywnej interpretacji wyników. Obszar modelu rozciągał się na 100 m w kierunku poziomym — od zewnętrznej krawędzi nasypu do granicy wykopu — oraz na 40 m w kierunku pionowym (do korony składowiska), co umożliwiała uchwycenie potencjalnych powierzchni poślizgu. W modelu wyrysowano gęstą siatkę elementów trójkątnych, zagęszczoną w rejonie kolumn, drenów oraz warstw geosyntetycznych, aby zapewnić wysoką dokładność odwzorowania rozkładu naprężeń i przemieszczeń. Pod warstwami geosyntetycznymi wprowadzono elementy kontaktu (*interface*) między gruntem a konstrukcją umożliwiające modelowanie potencjalnego poślizgu na styku grunt-zbrojenie. Parametry wytrzymałościowe interfejsu przyjęto na poziomie 80% kąta tarcia wewnętrznego gruntu przyległego. Trzy analizowane warianty wzmocnienia obejmowały poniższe konfiguracje.

- Wariant 1 zakładał zastosowanie wyłącznie kolumn oraz prefabrykowanych drenów pionowych (PVD) pod nasypem oraz w obrębie wykopu pod składowisko, przy czym pod stopą nasypu zastosowano pojedynczą warstwę geosiatki. Instalację kolumn ograniczono do bezpośredniej strefy fundamentowania pod nasypem, pozostawiając skarpy wewnętrzne bez wzmocnienia. Dreny pionowe rozmieszczono jedynie w obszarze, w którym spodziewano się konsolidacji warstw gruntów spoistych. Konfiguracja ta stanowiła wariant bazowy, służący do oceny potencjalnej poprawy warunków nośności wynikających z zastosowania dodatkowych elementów wzmocnienia.
- Wariant 2 przewidywał poziome rozszerzenie strefy wzmocnienia tak, aby obejmowała całą powierzchnię dna wykopu oraz skarpy nasypu. W tym wariantcie zastosowano kolumny żwirowe SC zamiast kolumn kamiennych wykonywanych metodą dynamicznej wymiany (DR). Dwie warstwy geosiatki rozmieszczono na dwóch poziomach, rozciągających się od dna wykopu do stopy nasypu. Gęstsza siatka drenów PVD została utrzymana na całej powierzchni niecki składowiska oraz częściowo rozszerzona pod skarpy nasypu. Schemat ten miał na celu ocenę scenariusza poprawy warunków geotechnicznych, jednak przy jednoczesnym wzroście kosztów materiałowych oraz wykonawczych.
- Wariant 3 stanowił rozwiązanie zoptymalizowane, w którym elementy wzmocnienia rozmieszczono w strefach zidentyfikowanych jako najbardziej krytyczne na podstawie wstępnych analiz wariantu 2. Kolumny SC oraz podwójne warstwy geosiatki skoncentrowano w obszarach, gdzie naturalna wytrzymałość gruntów była najniższa. W strefach o korzystniejszych parametrach geotechnicznych pozostawiono kolumny DR oraz pojedynczą warstwę geosiatki. Rozstaw drenów PVD

również zróżnicowano, stosując je wyłącznie w strefach krytycznych. Podejście to miało na celu weryfikację możliwości uzyskania zbliżonej do optymalnej efektywności konstrukcji przy jednoczesnym ograniczeniu całkowitej objętości zastosowanego wzmocnienia.

Dla każdego wariantu przeprowadzono analizy etapowego wznoszenia konstrukcji w celu zasymulowania procesu budowy nasypu oraz składowiska. Po zakończeniu każdego etapu budowy umożliwiano rozpraszanie nadwyżki ciśnienia wody w porach zgodnie z właściwościami konsolidacyjnymi gruntów oraz układem drenów PVD. Następnie wykonywano analizy stateczności metodą SSR (*Shear Strength Reduction*) polegające na stopniowej redukcji parametrów wytrzymałościowych c oraz ϕ aż do momentu wystąpienia globalnego mechanizmu zniszczenia. Do opisu profili gruntowych w obliczeniach przyjęto klasyczny model gruntowy Coulomb-Mohr. Analizy przeprowadzono zarówno dla końcowego etapu budowy (stan bez obciążenia eksploatacyjnego), jak i dla fazy użytkowania obiektu (stan pełnego obciążenia). Przykładowy model dla wariantu 3, ilustrujący konfigurację przyjętego rozwiązania zoptymalizowanego, przedstawia rysunek 2.

3. Wyniki analiz

3.1. Współczynnik stateczności oraz mechanizm zniszczenia

Analizy metodą SSR (*Shear Strength Reduction*) wykazały, że wariant 1 warunkowo spełnia wymagania normy Eurokod 7 w zakresie docelowego współczynnika bezpieczeństwa $FS \geq 1,25$, przy czym obliczone wartości mieściły się w przedziale od 1,27 do 1,55 dla analizowanych przekrojów. Krytyczne mechanizmy zniszczenia w warunkach obciążenia eksploatacyjnego były związane głównie z wystąpieniem powierzchni poślizgu, zlokalizowanych w rejonie stopy nasypu i przecinających skarpe nasypu w jej środkowej części. Pomimo formalnego spełnienia kryterium stateczności w rejonie instalacji kolumn zaobserwowano rozległe strefy uplastycznienia, co wskazuje na możliwość przeciążenia kolumn oraz ich boczne zniekształcenia.

W przeciwieństwie do wcześniejszej propozycji, wariant 2 charakteryzował się wartościami współczynnika bezpieczeństwa FS w zakresie od 1,36 (dla najbardziej krytycznego przekroju) do 1,90 (dla przekroju o najkorzystniejszych warunkach) w fazie

budowy, natomiast w fazie eksploatacyjnej wartości FS mieściły się w przedziale 1,39–1,83. W tym przypadku potencjalne powierzchnie zniszczenia lokalizowały się głębiej w podłożu gruntowym, a strefy uplastycznienia formowały się głównie w obrębie kolumn oraz na liniach kontaktu pomiędzy gruntem, a elementami geosyntetycznymi – nie w naturalnym podłożu gruntowym. Zastosowanie kolumn SC wraz z rozszerzonym zasięgiem wzmocnienia geosiatką umożliwiło skuteczne przeniesienie części obciążeń na elementy wzmocnienia, co potwierdza wysoką efektywność ich współdziałania.

Wariant 3 osiągnął wartości $FS \geq 1,42$ w fazie budowy oraz $FS \geq 1,39$ w fazie eksploatacji dla przekrojów krytycznych, przy jednocześnie mniejszym zróżnicowaniu wyników pomiędzy poszczególnymi przekrojami niż w przypadku wariantu 1. Zoptymalizowany układ wzmocnienia zapewnił globalną stateczność konstrukcji porównywalną z wariantem 2, przy jednoczesnym ograniczeniu powierzchni zastosowania geosyntetyków o 55% oraz liczby kolumn o 45%. Warto zauważyć, że lokalne uplastycznienie występowało jedynie w sąsiedztwie kolumn SC w najsłabszych strefach podłoża. Potwierdza to, że ukierunkowane (strefowe) wzmocnienie podłoża pozwala uzyskać efekt poprawy parametrów geotechnicznych tam, gdzie jest on najbardziej potrzebny, bez pogorszenia ogólnego poziomu bezpieczeństwa konstrukcji.

Wybrane wartości współczynnika bezpieczeństwa FS dla najbardziej reprezentatywnych przekrojów obliczeniowych zestawiono w tabeli 2.

3.2. Osiedzenia i charakterystyka przemieszczeń

Całkowite przemieszczenia oraz osiedlenia w warunkach obciążenia eksploatacyjnego wyznaczono na podstawie wyników końcowego etapu obliczeń dla każdego z modeli numerycznych. W wariantie 1 maksymalne całkowite przemieszczenie poziome w koronie nasypu osiągnęło wartość 0,48 m, natomiast maksymalne osiedlenie u podstawy wyniosło 0,44 m. Wartości te zbliżają się do granicznych poziomów użytkowności dla zachowania ciągłości (szczelności) geomembrany, biorąc pod uwagę typowe dopuszczalne odkształcenia w zakresie 3–5%. Ponadto nierównomierne osiedlenia pomiędzy sąsiednimi kolumnami generowały potencjalne naprężenia rozciągające w systemie uszczelniającym, co wskazuje na konieczność zachowania szczególnej ostrożności przy ocenie długoterminowej pracy konstrukcji.

W wariantie 2 maksymalne przemieszczenie korony nasypu

Rys. 2. Model obliczeniowy wariantu 3 wzmocnienia wraz z charakterystyką zastosowanych wzmocnień podłoża

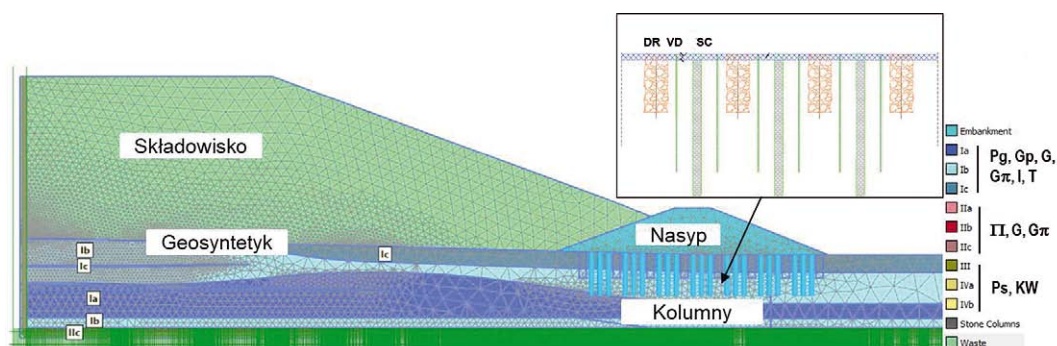


Tabela 2. Współczynniki stateczności wyznaczonych dla wybranych przekrojów obliczeniowych

Wybrane przekroje	Współczynnik stateczności dla rozbudowanych wariantów wzmocnienia			
	Faza budowy		Faza eksploatacyjna	
	Wariant 2	Wariant 3	Wariant 2	Wariant 3
V-V	1,40	1,43	1,52	1,39
VI-VI	1,42	1,50	1,66	1,46
VII-VII	1,60	1,49	1,67	1,40

zostało zredukowane do 0,22 m, natomiast maksymalne osiadanie wyniosło 0,28 m, co oznacza poprawę rzędu 50–60% w porównaniu z warunkami bez wzmocnienia. Przykłady wyników obliczeń całkowitych przemieszczeń dla dwóch scenariuszy wzmocnienia przedstawiono na rysunkach 3 i 4.

Analiza numeryczna osiadań wykazała bardziej równomierny rozkład odkształceń w przypadku zastosowania wzmocnienia, a kolumny skutecznie ograniczały ich zakresy i głębokość. Warstwy geosyntetyczne pracowały w zakresie dopuszczalnych odkształceń rozciągających (< 3%), co zapewniało stabilność systemu uszczelniającego składowiska. Analiza rozpraszania ciśnienia wody w porach wykazała, że około 70% nadwyżki ciśnienia ulegało dyssypacji w ciągu sześciu miesięcy od momentu zdeponowania odpadów, co pozostaje zgodne z założeniami projektowymi dotyczącymi przyspieszonej konsolidacji podłoża.

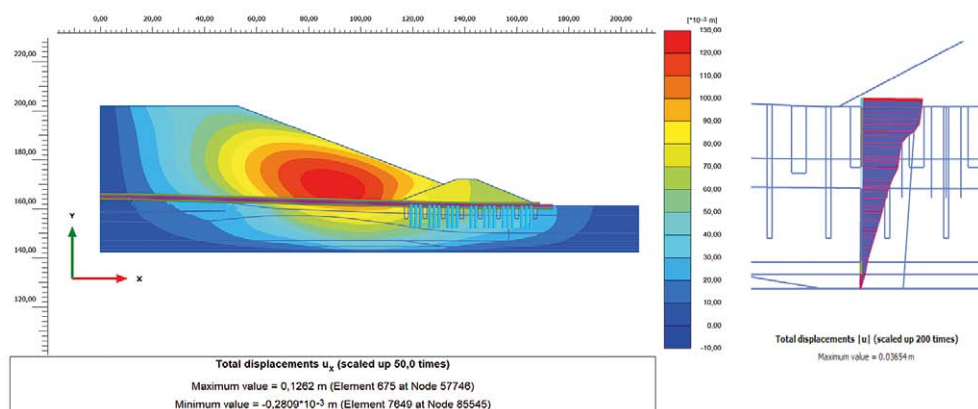
W wariantcie 3 maksymalne przemieszczenie poziome oraz osiadanie wyniosło 0,27 m. Wartości te są nieco wyższe niż

w wariantcie 2, jednak nadal pozostają poniżej wartości krytycznych przyjętych dla analizowanej konstrukcji. Zestawienie przemieszczeń dla obu wariantów przedstawiono w tabeli 3. Analizy ścieżek naprężeń w wybranych elementach modelu wykazały, że kombinacja kolumn wzmocniających oraz warstw geosyntetycznych skutecznie zmniejszała wartości naprężeń pionowych w strefach o większej sztywności, co w konsekwencji prowadziło do redukcji stref koncentracji i wartości naprężeń w słabszych gruntach podłoża.

W wariantcie 1 odnotowano wartości naprężeń dochodzące do 180 kPa w rejonie głowic kolumn DR, co korelowało z obserwowanymi odkształceniami bocznymi kolumn oraz potencjalnym rozwarstwieniem na styku kolumna–grunt. W wariantach 2 i 3 odkształcenia w obrębie kolumn SC były ograniczone do wartości poniżej 2% odkształcenia bocznego, natomiast naprężenia styczne na kontakcie warstw pozostawały poniżej 80 kPa. Podwójny układ warstw geosyntetycznych w wariantcie 2 przenosił obciążenia rozciągające dochodzące do 200 kN/m, podczas gdy pojedyncza warstwa zastosowana w zoptymalizowanych strefach Wariantu 3 osiągała wartości około 120 kN/m. Wyniki te wskazują na zachowanie odpowiednich rezerw nośności w odniesieniu do parametrów wytrzymałościowych deklarowanych przez producentów materiałów geosyntetycznych.

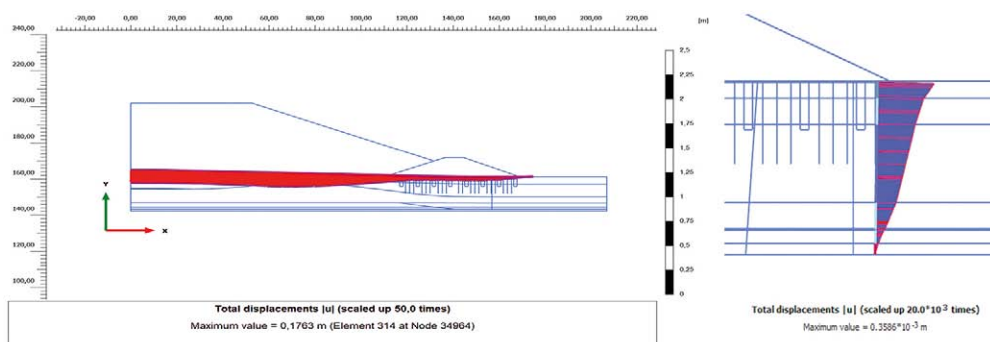
4. Podsumowanie

Analiza porównawcza trzech wariantów wzmocnienia podłoża wskazuje na kluczowe znaczenie połączenia instalacji kolumn

Rys 3. Przeszaczenia całkowite w wybranym przekroju dla wariantu 3, przy rozszerzonym zasięgu wzmocnień podłoża gruntowego, w fazie eksploatacyjnej wraz z rozkładem odkształceń w stopie nasypu**Tabela 3.** Przeszaczenia wyznaczone dla wybranych przekrojów obliczeniowych – porównanie dwóch wariantów wzmocnienia

Przekrój	Wariant 2			Wariant 3		
	Faza eksploatacyjna					
	Całkowite przemieszczenia (m)	Osiadania (m)	Poziome przemieszczenia (m)	Całkowite przemieszczenia (m)	Osiadania (m)	Poziome przemieszczenia (m)
III–III	0,30	0,03	0,01	0,066	0,065	0,01
IV–IV	0,04	0,24	0,01	0,1	0,13	0,01
V–V	0,22	0,07	0,01	0,27	0,27	0,02
VI–VI	0,16	0,01	0,01	0,11	0,11	0,01
VII–VII	0,05	0,05	0,01	0,004	0,005	0,01

Rys. 4. Rozkład odkształceń całkowitych w wybranym przekroju dla zoptymalizowanego rozwiązania wzmocnienia podłoża w wariancie 3 wraz z rozkładem odkształceń pod zewnętrzną skarpgą nasypu



wraz ze zbrojeniem warstwami geosyntetycznymi w celu zapewnienia odpowiedniej stateczności skarp składowiska oraz kontroli osiadań w złożonych warunkach geotechnicznych. Wartości współczynnika stateczności uzyskane dla wariantu 1 odzwierciedlają ograniczenia wynikające z zastosowania wyłącznie kolumn DR oraz drenów pionowych PVD, zwłaszcza w kontekście rygorystycznych wymagań normy Eurokod 7 dla obiektów III kategorii geotechnicznej. Wprowadzenie kolumn SC w wariancie 2 doprowadziło do poprawy globalnej stateczności nawet o 10%, a także do istotnej poprawy warunków stanu granicznego użyteczności poprzez redukcję osiadań o ponad 35%. Wyniki te są zgodne z dostępnymi w literaturze badaniami wskazującymi, że zastosowanie kolumn wraz z warstwami geosyntetycznymi może zwiększyć nośność podłoża nawet trzykrotnie w warunkach krótkotrwałego obciążenia (faza budowy) [1]. Ponadto zastosowanie dwuwarstwowego układu geosiatek zapewniło dodatkowy mechanizm redystrybucji obciążeń, pełniąc jednocześnie funkcję górnej warstwy wzmacniającej ograniczającej przemieszczenia skarp oraz dolnej warstwy stabilizującej dno niecki składowiska. Mimo że zwiększony zasięg wzmocnienia wiąże się z wyższymi kosztami materiałowymi i większym nakładem prac instalacyjnych, uzyskana poprawa wartości FS oraz większa jednorodność przemieszczeń uzasadniają zastosowanie tego rozwiązania w obiektach o podwyższonych wymaganiach bezpieczeństwa.

Zoptymalizowany wariant 3 pokazuje natomiast, że najbardziej efektywnym podejściem jest zaprojektowanie elementów wzmocnienia w strefach o najniższej naturalnej wytrzymałości rozpoznanych gruntów. Analizy numeryczne wykazały poprawę warunków nośności podłoża, w których zoptymalizowanie wzmocnienia w najsłabszych warstwach doprowadziło do znaczącej poprawy parametrów pracy konstrukcji. Należy jednak podkreślić, że tego typu optymalizacja wymaga szczegółowych badań geotechnicznych oraz wstępnego modelowania numerycznego, pozwalających na dokładną identyfikację stref krytycznych. Jednocześnie należy mieć na uwadze ograniczenia przyjętej metodyki badawczej. Założenie stanu odkształcenia płaskiego (plane strain) pomija efekty trójwymiarowe, które mogą odgrywać istotną rolę w rejonie obrysu nasypów lub wzdłuż warunków brzegowych modelu. Ponadto należy zwrócić uwagę, iż parametry materiałowe zostały wyznaczone na podstawie ograniczonego zestawu badań laboratoryjnych, terenowych oraz archiwalnych raportów dotyczących właściwości odpadów.

Szczegółowe analizy numeryczne metodą elementów skończonych (MES) wykazały, że pierwotnie proponowany system wzmocnienia, obejmujący kolumny DR oraz dreny PVD, zapewniał jedynie minimalne spełnienie wymagań stateczności określonych w EC7. Natomiast rozszerzone schematy wzmocnienia, obejmujące kolumny żwirowe SC oraz podwójne warstwy geosyntetyczne, prowadziły do znaczącej poprawy zarówno globalnego współczynnika stateczności, jak i warunków stanu granicznego użyteczności. Zoptymalizowany układ wzmocnienia, polegający na koncentracji wzmocnień w strefach najsłabszego podłoża, pozwolił osiągnąć $FS \geq 1,38$ w warunkach eksploatacyjnych oraz ograniczyć maksymalne osiadania do 0,30 m, przy wynikach zbliżonych do pełnego schematu wzmocnienia, lecz przy mniejszym zużyciu materiałów wzmacniających. Otrzymane wyniki podkreślają wysoką efektywność zintegrowanego stosowania geosyntetyków, drenów pionowych oraz kolumn wzmacniających w projektowaniu konstrukcji składowisk odpadów w wymagających warunkach geotechnicznych.

Należy pamiętać, iż przy wdrożeniu takich rozwiązań powinna towarzyszyć kompleksowa kontrola i monitoring geotechniczny, umożliwiające weryfikację prognoz modelowych oraz zapewnienie odpowiedniej trwałości i bezpieczeństwa obiektu w długim okresie eksploatacji.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Hataf N., Nabipour N., Sadr A., Experimental and numerical study on the bearing capacity of encased stone columns. *International Journal of Geo-Engineering* 11(1)2020, str. 4
- [2] Koda E., Osiński P., Podlasek A., Markiewicz A., Winkler J., Vaverková M. D., Geoenvironmental approaches in an old municipal waste landfill reclamation process: Expectations vs reality, *Soils and Foundations* 63(1)2023, art. 101273
- [3] Li J. Y. T., Shi K. B., Yan X. J., Basic analysis of homogenous slope stability by finite element method based on PLAXIS. *Advanced Materials Research* 446, 2012, str. 1838–1841
- [4] Lu X., Li C., An analytical solution for nonlinear consolidation of composite foundations improved by stone columns and vertical drains. *Computers and Geotechnics* 161, 2023, art. 105598
- [5] Potts D. M., Zdravković L., Addenbrooke T. I., Higgins K. G., Kovačević N. *Finite element analysis in geotechnical engineering: application* London: Thomas Telford, tom 2, 2001, str. 427
- [6] Xu G., Shi J., Yang Y., Jiang Z. Wedge method for landfill stability analysis considering temperature increase, *Waste Management & Research* 40(4)2021, str. 383–392

Zastosowanie badania dylatometrem płaskim DMT do wyznaczania początkowego modułu ścinania iłów plioceńskich

Evaluation of the initial shear modulus of Pliocene clays using the flat dilatometer test DMT

dr inż. Simon Rabarijoely (ORCID: 0000-0002-4409-223X), dr inż. Marek Bajda (ORCID: 0000-0002-3921-2268), dr inż. Mariusz Lech (ORCID: 0000-0003-1617-6361), dr inż. Katarzyna Markowska-Lech (ORCID: 0000-0001-6883-3605), dr inż. Zdzisław Skutnik (ORCID: 0000-0003-3228-4936), mgr inż. Konrad Szczygieski, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7938

Streszczenie: Sondowania dylatometryczne (DMT) mają szerokie zastosowanie w geotechnice, szczególnie do określenia ciągłego profilu gruntowego, jak również właściwości fizycznych i mechanicznych gruntów. Uzyskane z badań wskaźniki dylatometryczne (I_D , K_D , E_D i U_D) można wykorzystać do określenia wielu parametrów geotechnicznych, w tym modułu ścinania G_0 . Artykuł poświęcony jest analizie warunków geotechnicznych oraz wyznaczeniu zależności, pozwalających na obliczenie modułu ścinania G_0 iłów plioceńskich występujących w analizowanym podłożu. Badania przeprowadzono na poligonie badawczym Stegny w Warszawie. We wstępie przedstawiono opis sondowań standardowych (DMT) i sejsmicznych (SDMT) dylatometrem płaskim oraz sposób interpretacji uzyskanych wyników. Zaprezentowano także ogólny opis teoretyczny sondowań sejsmicznych wraz z charakterystyką fal poprzecznych i podłużnych wykorzystywanych w geotechnice. W artykule omówiono budowę geologiczną i warunki hydrogeologiczne panujące w podłożu oraz scharakteryzowano parametry geotechniczne analizowanych gruntów. **Słowa kluczowe:** moduł ścinania, badanie sejsmiczne, iły plioceńskie.

Abstract: The dilatometer test (DMT) is widely used in geotechnical engineering, particularly for determining the continuous soil profile and the physical and mechanical properties of soils. The dilatometer indexes obtained from the tests (I_D , K_D , E_D and U_D) can be used to determine numerous geotechnical parameters, including the shear modulus G_0 . This article analyzes the geotechnical conditions and determines the relationships required to calculate the shear modulus G_0 for Pliocene clays in the Stegny experimental site. The introduction presents a description of the tests using the standard Marchetti dilatometer and the seismic SDMT dilatometer, along with a method for interpreting the results. A general theoretical description of seismic testing is also presented, along with the characteristics of transverse and longitudinal waves used in geotechnics. Furthermore, the geological structure and hydrogeological conditions are discussed, and the site's geotechnical parameters are characterised.

Keywords: shear modulus, seismic dilatometer, Pliocene clays.

1. Wprowadzenie

Dynamiczny rozwój inwestycji budowlanych wymaga szybkiego i wiarygodnego rozpoznania warunków gruntowych, aby uniknąć nadmiernych osiadań i uszkodzeń konstrukcji. Jednym z badań terenowych wykorzystywanych w praktyce są badania standardowym dylatometrem płaskim (DMT) i dylatometrem sejsmicznym (SDMT). Badania te charakteryzują się nieskomplikowanym pomiarem, niedużym nakładem finansowym oraz wykorzystywane są do określania parametrów gruntowych i oceny warunków geotechnicznych zarówno do obliczeń projektowych, jak i badań kontrolnych w okresie budowy i eksploatacji.

Celem artykułu jest analiza uzyskanych wyników badań DMT pozwalających na obliczenie modułu ścinania G_0 iłów. Przeprowadzona analiza dotyczy wyników badań iłów występujących w podłożu poligonu doświadczalnego Stegny w Warszawie. Wynikiem końcowym jest propozycja formuły do wyznaczania modułu ścinania G_0 na podstawie badań DMT.

2. Charakterystyka i właściwości modułu ścinania G_0

Prawidłowe zaprojektowanie budowli inżynierskiej wymaga znajomości zachowania się gruntu pod obciążeniem. Do opisu

odkształcenia gruntu używane są wskaźniki ściśliwości lub moduły sprężystości, do których zaliczamy np. moduł G_0 . Moduł ścinania G opisuje sztywność gruntu przy działaniu naprężeń stycznych. Dla bardzo małych odkształceń stosuje się początkowy moduł ścinania G_0 (G_{max}). Wielkość tę można określić na podstawie bezpośredniego pomiaru prędkości fali poprzecznej V_s . Moduł ścinania G_0 oblicza się ze wzoru:

$$G_0 = \rho \cdot V_s^2 \quad (1)$$

gdzie:

ρ – gęstość objętościowa gruntu [t/m^3],

V_s – prędkość fali poprzecznej [m/s].

Podobnie jak wytrzymałość gruntów moduł ścinania jest funkcją wielu zmiennych, które zostały przedstawione we wzorze (2) [1]. Do czynników, które decydują o wartości modułu G_0 , zaliczamy: σ'_o – efektywne naprężenie oktaedryczne, e – wskaźnik porowatości, S – stopień nasycenia gruntu, C – charakterystyki granulometryczno-mineralogiczne, A – amplituda drgań, F – częstotliwość drgań, T – efekty zależne od czasu, θ – struktura gruntu, K – temperatura [1]:

$$G_0 = f(\sigma'_o, e, S, C, A, F, T, \theta, K) \quad (2)$$

W praktyce geotechnicznej najbardziej istotnymi czynnikami są naprężenie efektywne i wskaźnik porowatości. Najczęściej podawane są dwie podstawowe zależności (3), (4) zaproponowane przez Hardina i Blacka (1968 r.), Hardina (1978 r.) [1, 2]. W gruntach moduł ścinania jest funkcją stanu naprężenia efektywnego, wskaźnika porowatości, współczynnika prekonsolidacji oraz odkształcenia postaciowego [3]:

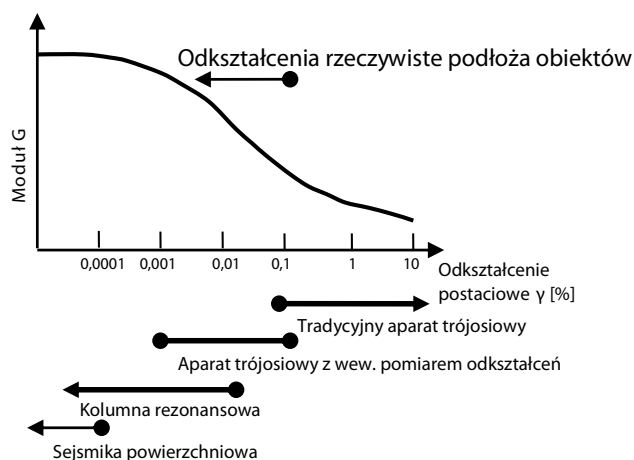
$$G_0 = A(T) F(e) \sigma'^n \quad (3)$$

$$G_0 = S(T) F(E) \sigma'^n OCR^k \quad (4)$$

Sztywność gruntu w zakresie małych odkształceń ($\gamma < 0,001\%$) jest ważnym czynnikiem bezpośrednio wpływającym na interakcję konstrukcji budowlanych z otaczającym je gruntem oraz w rozwiązywaniu geotechnicznych problemów brzegowych takich jak np. współpraca budowli podziemnych z otaczającym gruntem. Wielu badaczy [4–8] uważa, że poziom odkształcenia nawet przy statycznym stanie obciążenia konwencjonalnych fundamentów jest bardzo mały i wynosi mniej niż 10^{-6} . W literaturze dotyczącej odkształcalności gruntów można znaleźć opinie, że sprężysta albo idealnie sprężysta reakcja gruntu zdarza się tylko przy małych odkształceniach, przy których charakterystyki naprężenie-odkształcenie są liniowe [2, 4, 9–11]. W rzeczywistości zachowanie się gruntów jest zwykle nieliniowe (nieliniowo-sprężyste albo plastyczne) i anizotropowe, co rzadko jest uwzględniane w obliczeniach projektowych.

Zależność modułu ścinania G_0 od wartości odkształcenia ścinającego przyjmuje charakterystyczny kształt, określany w literaturze jako krzywa S (rys. 1).

Referencyjne wartości początkowego modułu ścinania określone są na podstawie pomiarów fali sejsmicznej z sondowań



Rys. 1. Rozkład zmienności sztywności gruntu w zależności od odkształceń [12]

in situ zarówno nieniszczących (metody geofizyczne), jak i niszczących (np. dylatometr sejsmiczny).

Na podstawie sondowań in situ (np. CPT, DMT) i badań laboratoryjnych opracowano dotychczas wiele zależności do wyznaczania początkowej wartości modułu ścinania gruntów G_0 bez konieczności pomiarów prędkości fali poprzecznej. Wartość modułu ścinania G_0 występuje w początkowym punkcie nieliniowej charakterystyki zależności modułu ścinania G od odkształceń ε . Do zależności najczęściej wykorzystywanych w praktyce należy zaliczyć:

- Hryciw (1990) [13]:

$$G_0 = \frac{530}{\left(\frac{\sigma'_{vo}}{Pa}\right)^{0.25}} \cdot \frac{\gamma_d - 1}{2.7 \cdot \frac{\gamma_d}{\gamma_w}} \cdot K_0^{0.25} \cdot (\sigma'_{vo} \cdot Pa)^{0.5} \quad (5)$$

- Mayne i Rix (1993) [14]:

$$G_0 = \frac{406 \cdot q_c^{0.696}}{e^{1.13}} \quad (6)$$

- Jamiolkowski i in. (1995) [15]:

$$G_0 = \frac{600 \cdot \sigma'_m^{0.5} \cdot Pa^{0.5}}{e^{1.3}} \quad (7)$$

gdzie:

G_0 – początkowy moduł ścinania (kPa),

e – wskaźnik porowatości (-),

K_0 – współczynnik parcia gruntu w spoczynku (-), który wyznaczono z sondowań DMT [16],

Pa – naprężenie referencyjne = 1 bar,

q_c – opór stożka (kPa),

γ_w – ciężar jednostkowy wody (kN/m^3),

γ_d – ciężar objętościowy szkieletu gruntowego (kN/m^3),

σ'_{vo} – naprężenie efektywne pionowe (kPa),

σ'_{ho} – naprężenie efektywne poziome (kPa),

σ'_m – naprężenie efektywne średnie ($\sigma'_m = \frac{\sigma'_v + 2 \cdot \sigma'_h}{3}$) (kPa).

Dotychczas nie prowadzono szerszych badań dotyczących uzyskania wartości G_0 iłów plicieńskich na podstawie badań DMT. W artykule przedstawiono propozycję wykorzystania sondowań dylatometrycznych DMT do określania modułu G_0 iłów plicieńskich.

3. Charakterystyka sondowania dylatometrem standardowym (DMT) i sejsmicznym (SDMT)

Dylatometr płaski składa się z końcówki pomiarowej z żerdziami, źródła sprężonego gazu i urządzenia kontrolno-pomiarowego (rys. 2). Kończówkę pomiarową dylatometru Marchettiego stanowi płaska, stalowa łopatką wyposażona w sprężystą membranę znajdującą się w jej centralnej części (rys. 2). Badanie DMT można wykonać w prawie każdych warunkach gruntowych, od gruntów organicznych, po „słabe” skały [16]. Po zagłębieniu ostrza dylatometru w gruncie na określonych głębokościach pomiarowych zwiększa się ciśnienie gazowe, wymuszając ruch membrany w kierunku gruntu. Wartość ciśnienia gazowego zwiększa się aż do wychYLENIA środka membrany o 1,1 mm. Wykonuje się głównie dwa pomiary ciśnienia A i B. Pomiar A odpowiada wartości ciśnienia gazowego, otrzymanej w początkowej fazie ruchu membrany prowadzącej do kontaktu z otaczającym gruntem. Drugi pomiar B wskazuje wartość ciśnienia gazowego uzyskaną przy dodatkowym wychYLENIU środka membrany w kierunku gruntu o 1,1 mm. Pomiary są wykonywane w stałych odstępach wynoszących 20 cm.

Korygując pomierzone wartości odczytów A, B ze względu na sztywność membrany, oblicza się odpowiadające im ciśnienia p_0 , p_1 , p_2 . Razem z wyznaczonymi w warunkach in situ wartościami składowej pionowej efektywnego naprężenia σ'_{vo} i ciśnienia wody w porach u_0 stanowią podstawę do wyznaczania czterech pośrednich parametrów wskaźnikowych, którymi są [16–18]:

- wskaźnik materiałowy [-]: $I_D = (p_1 - p_0) / (p_0 - u_0)$ (8)

- wskaźnik naprężenia bocznego [-]: $K_D = (p_0 - u_0) / \sigma'_{vo}$ (9)

- moduł dylatometryczny [MPa]: $E_D = 34,7 (p_1 - p_0)$ (10)

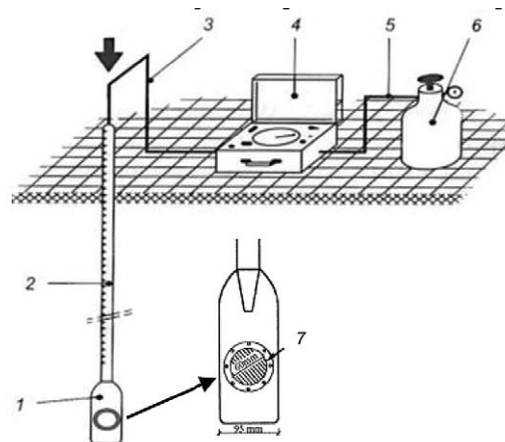
- wskaźnik ciśnienia wody w porach [-]:

$$U_D = (p_2 - u_0) / (p_0 - u_0) \quad (11)$$

Za pomocą korelacji empirycznych oraz określonych pośrednich współczynników, na podstawie badań dylatometrycznych DMT można określić wiele parametrów geotechnicznych.

Dylatometr sejsmiczny jest połączeniem standardowego dylatometru zaprezentowanego przez Marchettiego (1980 r.) [16] oraz modułu mierzącego prędkość rozchodzenia się fali sejsmicznej. Jako pierwszy został zaprezentowany przez Heptona (1988 r.) [19], a następnie udoskonalony na uniwersytecie Georgia Tech w Atlancie, USA (Martin i Mayne 1997r., 1998 r.; Mayne i in. 1999 r.) [20, 21]. Nowy układ z sejsmicznym dylatometrem (rys. 3) został ostatnio opracowany we Włoszech [22, 23].

Moduł sejsmiczny o kształcie walca zawiera dwa geofony pomiarowe zainstalowane w odległości 0,5 m i jest umieszczony nad końcówką pomiarową dylatometru (rys. 3a). Badanie polega na wygenerowaniu na powierzchni fali sejsmicznej oraz pomiarze czasu potrzebnego tej fali na pokonanie drogi pomiędzy dwoma geofonami w celu wyznaczenia jej prędkości w gruncie.



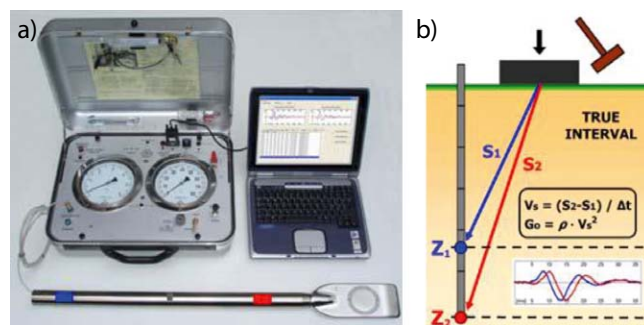
Rys. 2. Schemat budowy dylatometru płaskiego: 1 – łopatką dylatometru, 2 – żerdzie, 3 – przewód pneumatyczno-elektryczny, 4 – jednostka kontrolno-pomiarowa, 5 – przewód pneumatyczny, 6 – butla z gazem, 7 – membrana [16]

Schemat rozchodzenia się fali sejsmicznej został przedstawiony na rysunku 3b. Impuls sejsmiczny generowany jest przez uderzenie młotem w stalowy element docisnięty do podłoża w pobliżu profilu pomiarowego.

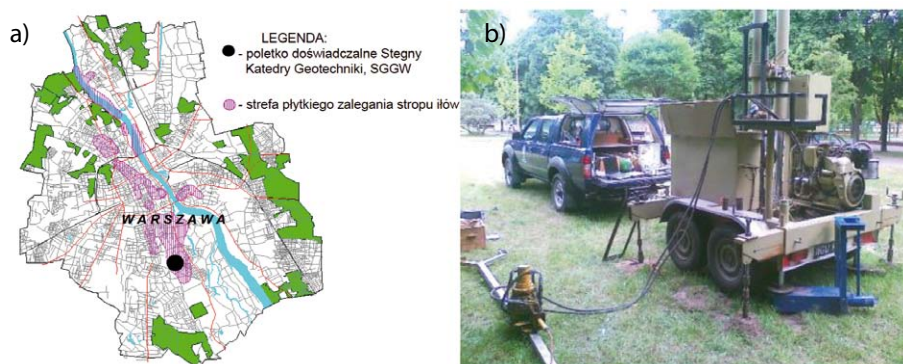
4. Poletko doświadczalne Stegny

Teren poletka doświadczalnego Stegny położony jest w dolinie Wisły, na tarasie nadzalewowym praskim na wysokości względnej od 5 do 10 metrów nad poziomem „0” Wisły. Obszerne badania terenowe [25] z wykorzystaniem między innymi dylatometru płaskiego wykazały, że w podłożu występują prekonsolidowane iły plicieńskie ($OCR = 3,0$ do $6,5$) charakteryzujące się wilgotnością w zakresie od 21,4 do 30,1%, wartościami granicy płynności w_L od 38,5 do 87,4% i granicy plastyczności W_p w zakresie od 20,9 do 41,0%. Grunty te są w stanie zwartym lub półzwartym.

Podstawowe właściwości iłów plicieńskich zależą od zawartości frakcji iłowej [26, 27, 28]. Analizowane iły charakteryzują się wyjątkową wrażliwością w stosunku do działających procesów egzogenicznych, czyli procesów geologicznych, wywoływanych przez czynniki zewnętrzne [26]. Zjawiska takie jak zamarzanie, odmarzanie, kurczenie, rozmakanie



Rys. 3. Aparatura i sposób prowadzenia sondowań dylatometrycznych (a), wyposażenie dylatometru sejsmicznego (b) – pomiar prędkości fali [24, 25]



Rys. 4. Lokalizacja terenu badań: a) poligon badawczy Stegny, b) ogólny widok na teren poligonu badawczego [29]

oraz pęcznienie powodują, iż osady te mogą ulegać wietrzeniu oraz dezintegracji. Lokalizację analizowanego obiektu przedstawiono na rysunku 4.

Na analizowanym terenie przeprowadzono 10 badań DMT do głębokości 11 metrów i jedno do 18 metrów oraz badania dylatometrem sejsmicznym (SDMT) w trzech profilach do głębokości 16 metrów. Na rysunku 5 przedstawiono przykładowe profile wskaźników dylatometrycznych w analizowanym podłożu. Wyniki badań dylatometrycznych wskazują, że iły płoceńskie są jednorodne. Warstwa ilów płoceńskich charakteryzuje się wartościami K_D w zakresie 3,5–8,0.

Celem przeprowadzonych obliczeń jest wyznaczenie początkowego modułu ścinania G_0 oraz wybranych parametrów wytrzymałościowych: współczynnik prekonsolidacji OCR, wytrzymałość na ścinanie bez odpływu τ_{fu} , moduł ściśliwości M , kąt tarcia wewnętrznego φ' , spójność c' [30]. W tym celu zostały przeprowadzone wiercenia, badania terenowe (DMT, SDMT) i laboratoryjne. Rezultatem jest zbiór wyników, których wnikliwa analiza pozwoliła na wyznaczenie modułu ścinania G_0 oraz umożliwiła określenie historii naprężenia gruntu.

5. Proponowana metoda wyznaczenia modułu ścinania G_0

5.1. Generalna zasada oraz opis metody

Moduł ścinania G_0 można wyznaczyć dwoma sposobami. Pierwszy, najbardziej miarodajny i dający referencyjne wartości polega na pomiarze prędkości fali poprzecznej V_s

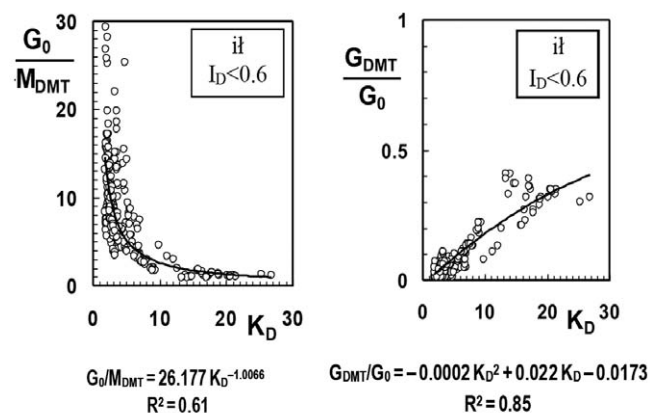
bezpośrednio w badaniach terenowych (np. SDMT) a następnie korzystając ze wzoru (1) obliczeniu wartości modułu ścinania G_0 na podstawie gęstości gruntu i prędkości fali poprzecznej V_s . Drugi sposób (pośredni) oparty jest na wyznaczeniu modułu ścinania G_0 na podstawie empirycznych korelacji wykorzystujących parametry uzyskane ze standardowego badania dylatometrem płaskim. W interpretacji sondowań dylatometrycznych

do określania parametrów odkształceniowych gruntów mineralnych (moduł ściśliwości M , moduł ścinania G) i wytrzymałościowych stosowane są zależności empiryczne podane w literaturze [16, 17, 22, 23, 32]. W 2008 roku Marchetti i inni [22] zaproponowali nową metodę określania początkowej wartości modułów ścinania G_0 gruntów mineralnych. W metodzie tej na podstawie pomierzonej wartości wskaźnika naprężenia bocznego K_D określa się stosunek G_0/M_{DMT} oraz G_{DMT}/G_0 według zależności podanych na rysunkach (rys. 6).

6. Proponowana metoda określenia modułu ścinania G_0

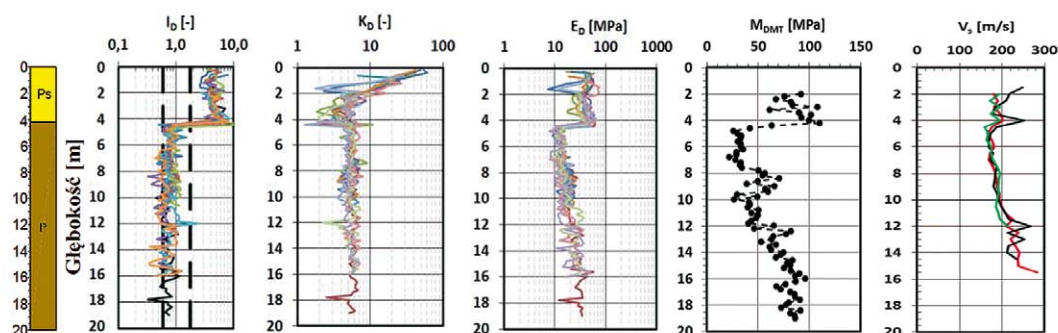
6.1. Ogólne założenie i opis metody

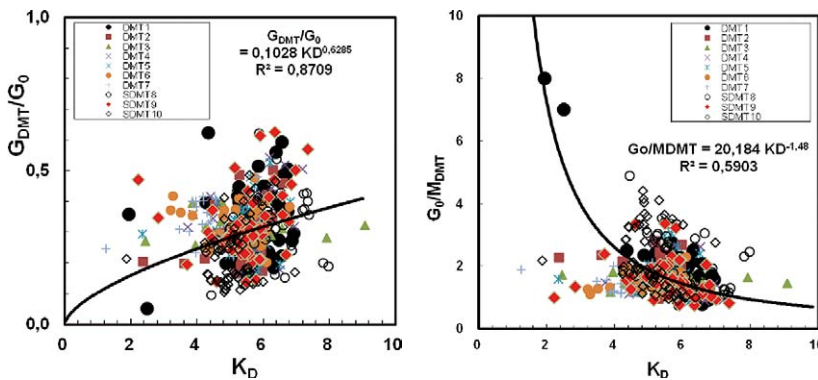
Proponowana metoda jest rozwinięciem metody zaproponowanej przez Marchettiego i innych (2008) [22] do określania



Rys. 6. Zależność G_0/M_{DMT} i G_{DMT}/G_0 od K_D [22]

Rys. 5. Wyniki badań DMT i SDMT dla poligonu doświadczalnego Stegny w Warszawie





Rys. 7. Zależność G_{DMT}/G_0 i G_0/M_{DMT} od K_D dla iłów plicieńskich z obiektu doświadczalnego Stegny

modułu G_0 dla gruntów mineralnych. W celu uzyskania wartości wytrzymałości na ścinanie τ_{fu} dla analizowanych iłów przeprowadzono trzy serie badań w aparacie trójosiowego ściskania na próbkach gruntu pobranych z głębokości 6, 9, 12 i 15 m.

Uzyskane wartości wytrzymałości na ścinanie τ_{fu} zgodnie z teorią sprężystości dla liniowego odcinka zależności naprężenie-odkształcenie wykorzystano do obliczenia odkształcenia stycznego $\gamma = \tau_{fu}/G_0$. Następnym krokiem proponowanej metody jest określenie zależności modułu ścinania G_0 od odkształcenia stycznego γ .

Jako referencyjne wartości G_0 wykorzystano wyniki z badań sejsmicznych SDMT. Na rysunku 7 przedstawiono zależność pomiędzy G_0/M_{DMT} i wskaźnikiem naprężenia bocznego K_D . Wartości wskaźników K_D i M_{DMT} uzyskano z sondowań dylatometrycznych, których wyniki zaprezentowano na rysunku 5. Analiza wyników sondowań i obliczeń umożliwiła określenie dla analizowanych iłów następującej zależności potęgowej pomiędzy G_0/M_{DMT} i K_D (15):

$$\frac{G_0}{M_{DMT}} = 20,184 \cdot K_D^{-1,48} \quad (15)$$

Korzystając z równania (15) określono dla analizowanych iłów następujące zależności (rys. 8, wzory 16, 17 i 18):

$$G_{0-DMT} [MPa] = \frac{0,981 \cdot \tau_{fu} [MPa]}{\gamma [\%]} \quad (16)$$

$$G_{0-DMT} = 0,66 \cdot \gamma^{-0,749} \quad (17)$$

$$\tau_{fu} = 0,66 \cdot \gamma^{0,25} \quad (18)$$

W celu zweryfikowania uzyskanej zależności, porównano dla całego profilu wartości G_0 obliczone proponowanym wzorem (15) oraz wzorem Marchetti i inni 2008 [22] (rys. 6) z wartościami G_0 uzyskanymi na podstawie badań SDMT (rys. 9). Analizując zestawienie wyników na rysunku 9, można stwierdzić, że wzór zaproponowany przez autorów charakteryzuje się wysokim stopniem dopasowania w stosunku do wartości referencyjnych uzyskanych na podstawie pomiarów sejsmicznych. Uzyskany współczynnik determinacji dla

zaproponowanej zależności na poziomie $R^2 = 0,79$ świadczy o wysokim stopniu dopasowania. Wartości uzyskane na podstawie zależności Marchetti i in. 2008 [22] znacznie odbiegają od wartości referencyjnych, a współczynnik determinacji dla tej zależności wynosi $R^2 = 0,16$, co świadczy o niskim dopasowaniu zależności i braku możliwości wykorzystania wzoru w badanych iłach. Tak duża różnica wynikać może z różnej historii naprężenia gruntów poddanych analizie w obu wzorach (rozpatrywane iły plicieńskie $K_D \approx 8,0$; grunty spoiste badane przez Marchettiego, $K_D = 2,0$). Podsumowując, można stwierdzić, że zaproponowana zależność pozwala na uzyskanie poprawnych wartości początkowego modułu ścinania G_0 w analizowanych silnie prekonsolidowanych iłach plicieńskich. Wykorzystanie tej zależności w innych gruntach spoistych wymaga zweryfikowania uzyskanych wyników poprzez badania z wykorzystaniem pomiaru prędkości fali ścinającej V_s .

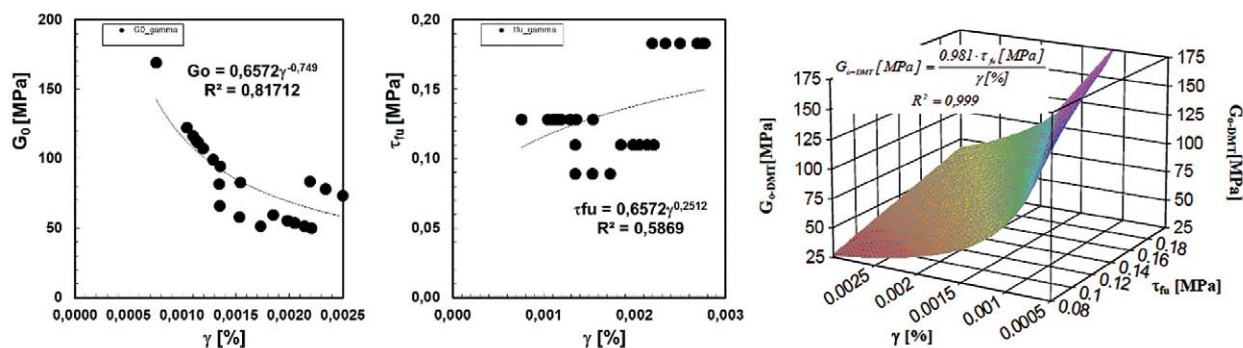
7. Podsumowanie

Moduł ścinania G_0 , parametr charakteryzujący sztywność gruntu, jest niezbędny w obliczeniach stanu naprężenia i odkształcenia podłoża projektowanych budowli. Określenie modułu G_0 jest trudnym zadaniem badawczym, głównie ze względu na zapewnienie kontrolowanych warunków małych odkształceń gruntu. W badaniach laboratoryjnych i terenowych należy wykonać pomiary prędkości fali sejsmicznej za pomocą specjalistycznej aparatury badawczej. W praktyce często wykorzystywane są do określenia modułu G_0 zależności empiryczne, między innymi z sondowań dylatometrycznych. Do określenia modułu ścinania G_0 iłów plicieńskich może być wykorzystana metoda zaproponowana w niniejszym artykule.

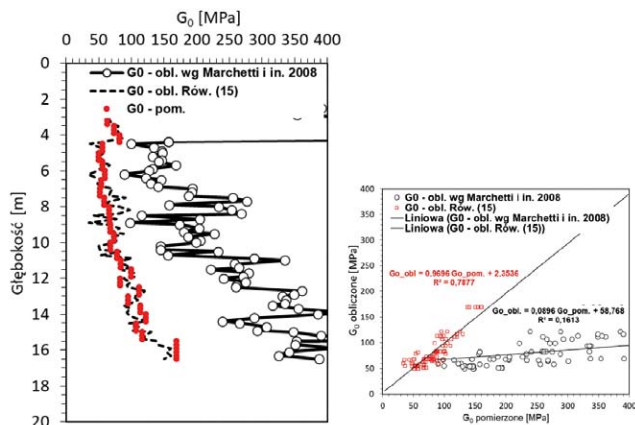
Zaproponowane zależności empiryczne powinny być zweryfikowane przez badania np. dylatometrem sejsmicznym (SDMT) w innych warunkach gruntowych. Moduł ścinania G_0 uzyskany na podstawie zaproponowanej empirycznej korelacji może być wykorzystywany do obliczeń sztywności gruntu na równi z tym uzyskanym bezpośrednio na podstawie pomiarów prędkości fali poprzecznej V_s w trakcie sondowań sejsmicznym dylatometrem SDMT.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Hardin B. O., Black W. L., Vibration modulus of normally consolidated clay (closure). Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 94(2)1968, str. 353–369
- [2] Hardin B. O., The Nature of Stress-Strain Behaviour of Soils, Pasadena, CA, ASCE, New York, Earthquake Engineering and Soil Dynamics, tom 1, 1978, str. 3–90
- [3] Shibuya S., Tatsuoka F., Teachavorasinsun S., Kong X. J., Abe F., Kim Y. S., Park C. S., Elastic Deformation Properties of Geomaterials, Soils and Foundations, Journal of the Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering 32, 3/1992, str. 23–46



Rys. 8. Zależność pomiędzy G_{0-DMT} i τ_{1u} od γ dla iłów plicieńskich na podstawie badań dylatometrycznych ze Stegien



Rys. 9. Porównanie wartości G_{0-DMT} obliczonej ze wzoru (15) oraz wzorów empirycznych (rys. 7) z wartościami pomierzonymi G_0 dla iłów plicieńskich na podstawie sondowań dylatometrycznych

- [4] Jardine R. J., Potts D. M., Fourie A., Burland J. B., Studies of the Influence of Non-Linear Stress-Strain Characteristics in Soil-Structure Interaction. Geotechnique 36, 3/1986, str. 377–396
- [5] Battaglio M., Jamiolkowski M., Analisi delle Deformazioni. XII CGT, Politecnico di Torino, 1987
- [6] Burland J. B., Small is Beautiful – The stiffness of Soil at Small Strains. Proceedings of the 9th Laurits Bjerrum Memorial Lecture, Canadian Geotechnical Journal 26, 4/1989, str. 499–516
- [7] Berardi R., Lancellotta R., Stiffness of Granular Soils from Field Performance. Geotechnique 41, 1/1991, str. 149–157
- [8] Maugeri M., Castelli F., Massimino M. R., Verona G., Observed and Computed Settlements of Two Shallow Foundations on Sand. Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE 124, 7/1998, str. 595–605
- [9] Jardine R. J., Symes M. J., Burland J. B., The Measurement of Soil Stiffness in the Triaxial Apparatus. Geotechnique 34, 3/1984, str. 323–340
- [10] Atkinson J. H., Sallfors G., Experimental determination of stress-strain-time characteristics in laboratory and in situ tests. Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering V3, 1991, str. 915–956
- [11] Lai C. G., Rix G. J., Solution of the Rayleigh Eigenproblem in Viscoelastic Materials. Bulletin of the Seismological Society of America V92(6)2002, str. 2297–2309
- [12] Atkinson J. H., Non-linear soil stiffness in routine design, Geotechnique 50, 5/2000, str. 487–508
- [13] Hryciw R. D., Small Strain Shear Modulus of Soil by Dilatometer. JGED, ASCE 116, 11/1990, str. 1700–1715
- [14] Mayne P. W., Rix G. J., G_{max} - q_c Relationships for Clays., Geotechnical Testing Journal 16, 1/1993, str. 54–60
- [15] Jamiolkowski M., Lo Presti, D. C. F., Pallara O., Role of In-Situ Testing in Geotechnical earthquake Engineering. Proceedings of 3rd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamic, State of the Art 7, St. Louis, Missouri, April 2–7, tom II, 1995, str. 1523–1546
- [16] Marchetti S., In Situ Tests by Flat Dilatometer. J. Geotech. Eng. Div., ASCE, 106, 1980, GT3, str. 299–321
- [17] Lutenegeger A. J., Kabir M. G., Dilatometer C-reading to help determine stratigraphy, Orlando, Proc. Int. Sym. on Penetration Testing ISOPT-1, 1/1988, str. 549–553
- [18] Totani G., Clabrese M., Monaco P., In situ determination of ch by flat plate dilatometer. Proceedings of ISC-1, Atlanta, Georgia, 1998. 883–888, Amoroso S., Monaco P., Diego M., 2012: Use of the seismic dilatometer (SDMT) to estimate in situ G-g decay curves in various soil types. Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2012 – IARG 2012 Padova, 2–4 luglio 2012
- [19] Hepton P., Shear wave velocity measurements during penetration testing. Proc. Penetration Testing in the UK ICE, 1988, str. 275–278
- [20] Martin G. K., Mayne P. W., Seismic Flat Dilatometer Tests in Connecticut Valley Varved Clay. ASTM Geotech. Testing J. 20(3)1997, str. 357–361
- [21] Mayne P. W., Schneider J. A., Martin G. K., Small- and large-strain soil properties from seismic flat dilatometer tests. In Proc. 2nd Int. Symp. on Pre-Failure Deformation Characteristics of Geomaterials, Torino 1/1999, str. 419–427
- [22] Marchetti S., Monaco P., Totani G., Marchetti D., 2008: In Situ Tests by Seismic Dilatometer (SDMT). ASCE Geot. Special Publication GSP 170 honoring Dr. J. H. Schmertmann, New Orleans, March 9–12, 2008
- [23] Amoroso S., Monaco P., Diego M., Use of the seismic dilatometer (SDMT) to estimate in situ G-g decay curves in various soil types. Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2012 – IARG 2012 Padova, 2–4 luglio 2012
- [24] Monaco P., Marchetti S., Totani G., Marchetti D., Interrelationship between Small Strain Modulus G_0 and Operative Modulus. IS-Tokyo2009. International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, June 2009
- [25] Rabarijoely S. wraz z zespołem, Dobór parametrów wytrzymałościowo-odkształceniowych gruntów spoistych w projektowaniu geotechnicznym według Eurokodu 7 z wykorzystaniem analizy bayesowskiej. Projekt badawczy N N506 2012, 432436
- [26] Barański M., Kaczyński R., Borowczyk M., Krauzlis K., Trzciniński J., Wójcik E., Granacki W., Szczepański T., Zawrzykraj P., Ocena zachowania się iłów plicieńskich ze Stegien w warunkach naprężeń efektywnych. Sprawozdanie z projektu badawczego KBN Nr 5T12B 041 22, Archiwum Wydziału Geologii, 2004
- [27] Godlewski T., Szczepański T., Determination of soil stiffness parameters using in-situ seismic methods: insight into repeatability and methodological aspects. Proceedings of ISC'4, 17–21 September 2012, Porto de Galinhas, Pernambuco, Brazil, 1, 2012a, str. 441–446
- [28] Godlewski T., Szczepański T., Ustalanie parametrów sprężystości gruntów przy użyciu sejsmicznych metod in situ – wpływ metodyki, XVI KKMGIIG, 4–7 września 2012, Wrocław Inżynieria Morska i Geotechnika, 2012b, str. 328–333
- [29] Bajda M., Lech M., Markowska-Lech K., The use of resistivity and seismic cone penetration tests for site characterization. Ann. Warsaw Univ. of Life Sci. – SGGW, Land Reclam. 40, 2008, str. 87–96
- [30] Lechowicz Z., Rabarijoely S., Wykorzystanie badań dylatometrycznych do wyznaczania warstw geotechnicznych podłoża organicznego, Materiały na Jubileuszową Sesję Naukową. Geotechnika w Budownictwie i Inżynierii Środowiska, Gdańsk, 2000, str. 253–258
- [31] Amoroso S., G-g decay curves by seismic dilatometer (SDMT), PhD Thesis, University of L'Aquila, 2011

Analiza obrazu jako narzędzie oceny kolmatacji geowłóknin oraz zmian ich właściwości filtracyjnych

Image analysis as a tool for assessing geotextile clogging and changes in their filtration properties

dr inż. Anna Markiewicz (ORCID: 0000-0002-7715-2809), Instytut Inżynierii Lądowej, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7939

Streszczenie: Geowłókniny pełniące w konstrukcjach inżynierskich funkcję filtracyjną są szczególnie narażone na kolmatację. Kolmatacja fizyczna, w której dochodzi do nagromadzenia się drobnych cząstek gruntowych wewnątrz materiału, prowadzi do zmniejszenia przepuszczalności poprzecznej geosyntetyków, wpływając negatywnie na wydajność systemów drenażowych z ich zastosowaniem. Celem niniejszego artykułu jest ocena możliwości wykorzystania analizy obrazu SEM oraz CT jako narzędzi do określenia stopnia kolmatacji geowłóknin oraz zmian ich parametrów hydraulicznych. Badania laboratoryjne przeprowadzono dla geowłókniny igłowanej poddanej procesowi kolmatacji w warunkach symulowanego przepływu wody przez ośrodek gruntowy. Przed i po testach filtracyjnych wykonano wysokorozdzielcze obrazy mikrostruktury materiału, które poddano analizie w celu określenia sposobu retencji cząstek gruntowych. Przedstawione wyniki badań mają charakter pilotażowy. Wskazują jednak, że zaproponowana metodyka może umożliwiać obiektywną i powtarzalną ocenę postępu kolmatacji oraz dostarczać informacji na temat mikrostrukturalnych mechanizmów odpowiedzialnych za degradację właściwości filtracyjnych geowłóknin.

Słowa kluczowe: geowłókniny, filtracja, kolmatacja, SEM, CT.

Abstract: Nonwoven geotextiles performing a filtration function in engineering structures are particularly susceptible to clogging. Physical clogging, the accumulation of fine soil particles within the material, reduces the permeability normal to the plane of geosynthetics, negatively affecting the efficiency of drainage systems that incorporate them. The aim of this paper is to provide a preliminary assessment of the potential use of SEM and CT image analysis as tools for determining the degree of geotextile clogging and changes in its hydraulic properties. Laboratory tests were conducted on needle-punched geotextile subjected to clogging under simulated water flow through a soil medium. High-resolution images of the material microstructure were captured before and after filtration tests and analyzed to determine the mode of soil particle retention. The results indicate that the proposed methodology enables an objective, repeatable assessment of clogging progression and provides insight into the microstructural mechanisms underlying the degradation of geotextile filtration properties.

Keywords: nonwoven geotextiles, filtration, clogging, SEM, CT.

1. Wprowadzenie

Geowłókniny to płaskie, nietkane wyroby tekstylne, wytworzone z losowo ułożonych włókien ciętych lub ciągłych łączonych chemicznie, termicznie lub mechanicznie [1]. Spośród geowłóknin łączonych mechanicznie najbardziej popularne są geowłókniny igłowane. Proces igłowania polega na przeciąganiu włókien w runie (produktu wyjściowego do produkcji geowłóknin) za pomocą igieł o długości około 75 mm z wielokierunkowymi nacięciami (zaczepami, zadziórami), które powodują przesuwanie włókien w kierunku prostopadłym do płaszczyzny runa i związanie w ten sposób poszczególnych jego warstw. Podczas przesuwania włókien następuje ich wzajemne zaplątywanie, co powoduje wzrost masy powierzchniowej i prowadzi do uzyskania trójwymiarowej struktury runa, a w efekcie wpływa na wytrzymałość materiału [2, 3].

Geowłókniny igłowane najczęściej pełnią funkcję filtracyjną, tj. zapobiegają mieszanii się materiałów o różnym uziarnieniu, przy jednoczesnym zapewnieniu swobodnego przepływu wody w kierunku prostopadłym do płaszczyzny wyrobu. Stosuje się je jako element drenażu francuskiego i do owijania rur drenarskich, co zapobiega zamulaniu przewodów i podnosi wydajność drenażu, a także w konstrukcji dachów zielonych lub jako warstwa filtracyjna ograniczająca erozję wewnętrzną w budownictwie hydrotechnicznym, do zabezpieczenia brzegów rzek, ochrony wybrzeży oraz przy budowie wałów przeciwpowodziowych i zbiorników wodnych [1, 4, 5]. Tak powszechne stosowanie filtrów geosyntetycznych wynika z ich licznych zalet, w tym możliwości użycia mniejszych średnic drenów, zmniejszenia objętości wykopów, zmniejszenia kosztów w stosunku do drenaży mineralnych oraz ryzyka niewłaściwej segregacji kruszywa

w obrębie drenów w trakcie ich wykonywania, czy mniejszych strat materiałowych [6]. Niemniej jednak stosowanie geowłóknin filtracyjnych wiąże się także z możliwością wystąpienia niepożądanych zjawisk, takich jak zatykanie, blokowanie cząstkami, czy kolmatacja [7–9].

Kolmatacja to długotrwały proces gromadzenia się drobnych cząstek, najczęściej gruntowych, w porach (wewnątrz) materiału geotekstylnego – kolmatacja mechaniczna, rozwoju pleśni, grzybów w porach geowłóknin – kolmatacja biologiczna, czy też wytrącania się tlenków żelaza, manganu, a także soli (np. węglanów i siarczanów) w strukturze filtru – kolmatacja chemiczna [10]. W zależności od miejsca wbudowania geowłókniny jest ona podatna za każdym razem na inny rodzaj kolmatacji. Kolmatacja chemiczna, biologiczna i mechaniczna może też występować jednocześnie. Badania wpływu procesu kolmatacji chemicznej i biologicznej na przepuszczalność geotekstyliów były przeprowadzane przede wszystkim dla geowłóknin stosowanych jako warstwy filtracyjne w systemach drenażowych na składowiskach odpadów [11, 12]. Natomiast do oceny wpływu kolmatacji mechanicznej na warunki przepływu w filtrach geosyntetycznych najczęściej przeprowadza się badania w układzie grunt-geowłóknina w urządzeniach pozwalających na skuteczne zakolmatowanie próbek materiałów geosyntetycznych [6, 10, 13].

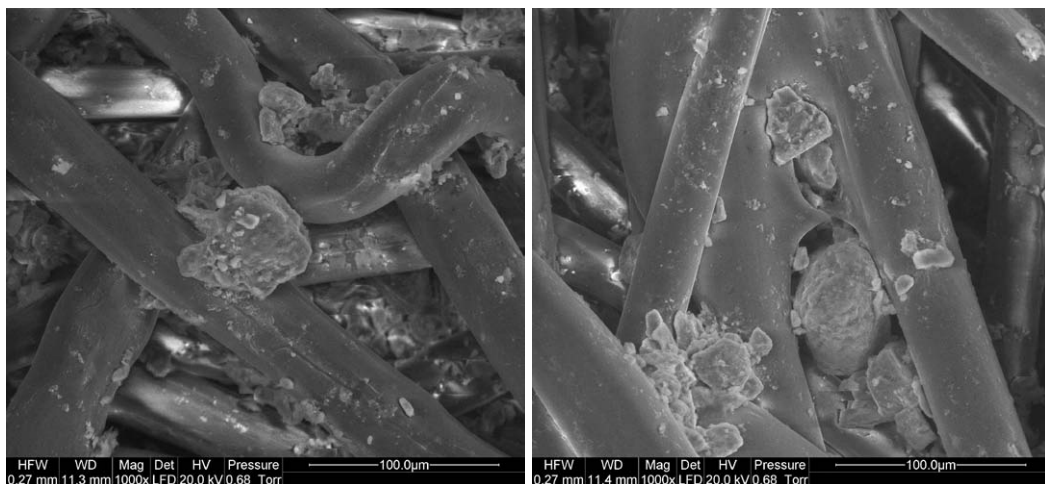
W związku z powyższym prawidłowy dobór geowłóknin na warstwy filtracyjne powinien opierać się na spełnieniu przez nie trzech podstawowych kryteriów, tj. kryteriów retencji (zatrzymywania cząstek), przepuszczalności oraz odporności na kolmatację [5, 14].

O skuteczności procesu filtracji decydują zatem zarówno właściwości gruntu chronionego, jak i zastosowanego wyrobu geotekstylnego [15]. Najważniejszymi cechami geowłóknin filtracyjnych są wymiar porów, wodoprzepuszczalność w kierunku prostopadłym do płaszczyzny wyrobu i parametry fizyczne: grubość, masa powierzchniowa, gęstość włókien, średnica włókien. Wymiar porów może być określony jako: FOS (ang. *Filtration Opening Size*, tj. O_{100}), EOS lub AOS (ang. *Equivalent Opening Size*; *Apparent Opening Size*,

tj. O_{95}), bądź O_{90} . Wprowadzono także dodatkowe pojęcia: PSD (ang. *Pore Opening Size Distribution* – dla geowłóknin i geotkanin) oraz CSD (ang. *Constriction Size Distribution* – tylko dla geowłóknin igłowanych). W Europie wyznaczany metodą przesiewania na mokro i stosowany w kryteriach doboru geowłóknin na warstwy filtracyjne jest charakterystyczny wymiar (średnica) porów O_{90} [16]. Warto zaznaczyć, że przy wyznaczaniu średnic włókien do obliczenia liczby przewężeń geowłóknin igłowanych możliwe jest zastosowanie analizy obrazu, zwłaszcza zdjęć wykonanych techniką SEM, tj. Skaningowym Mikroskopie Elektronowym [17]. Skaningowy Mikroskop Elektronowy, dzięki zastosowaniu nieniszczącej wiązki elektronów, pozwala na obrazowanie próbek w wysokiej rozdzielczości, jednocześnie osiągając bardzo duże powiększenia [18]. Analiza zdjęć SEM pozwala nie tylko na wyznaczenie średnicy włókien geowłóknin przed ich eksploatacją, ale może być także niezwykle pomocnym narzędziem do oceny zakolmatowania próbek geowłóknin bez konieczności niszczenia próbek. Veylon i in. [19] przeprowadzili badania parametrów fizycznych i hydraulicznych, a także analizę obrazu pięciu próbek geowłókniny pobranych po 18 latach eksploatacji w systemie drenażowym w regionie Trevies we Francji, potwierdzając dzięki nim znaczne zatkanie porów geowłókniny. Także Miskowska [6] przedstawiła zdjęcia wykonane SEM geowłóknin o zróżnicowanej liczbie przewężeń zakolmatowanych w warunkach laboratoryjnych piaskiem z pyłem (rys. 1).

Oprócz mikroskopii skaningowej w badaniach struktury geosyntetyków mogą być wykorzystywane również inne techniki obrazowania. Wciąż bardzo rzadko stosowaną, a jednocześnie nowoczesną techniką obrazowania jest tomografia komputerowa, powszechnie kojarzona głównie z zastosowaniami medycznymi. Tomografia komputerowa (CT, ang. *Computed Tomography*) należy do technik wykorzystujących promieniowanie rentgenowskie i umożliwia uzyskiwanie obrazów warstwowych badanego obiektu. Metoda ta polega na rejestrowaniu projekcji obiektu wykonywanych z wielu kierunków, które następnie poddawane są rekonstrukcji w celu uzyskania obrazów przekrojowych

Rys. 1. Przykładowe zdjęcia SEM zakolmatowanych próbek geowłóknin igłowanych PP [6]



Rys. 2. Krzywa uziarnienia gruntu wykorzystanego w procesie kolmatacji geowłókniny

(2D) oraz przestrzennych modeli (3D). Proces tworzenia obrazu tomograficznego opiera się na pomiarze stopnia pochłaniania promieniowania przechodzącego przez badany materiał. Analizowana objętość dzielona jest na niewielkie elementy przestrzenne, zwane voxelami, w których przyjmuje się jednakową wartość liniowego współczynnika pochłaniania promieniowania. Zrekonstruowany obraz przekroju stanowi ilościową mapę rozkładu tego współczynnika dla voxelów tworzących daną warstwę badanego materiału. Rozkład współczynników pochłaniania wyznaczany jest z wykorzystaniem obliczeń komputerowych, co stanowi podstawę nazwy tej metody. Podczas badania wiązka promieniowania X kierowana jest na analizowany obiekt, a jego natężenie po przejściu przez niego rejestrowane jest przez panel detektorów. W trakcie przechodzenia promieniowanie ulega osłabieniu, którego wielkość zależy od energii promieniowania oraz od rodzaju i grubości badanego materiału [20]. Ze względu na wysoki koszt aparatury, długi czas skanowania i analizy danych oraz konieczność zaawansowanego przetwarzania obrazu 3D tomografia komputerowa jest stosowana w badaniach geosyntetyków znacznie rzadziej niż metody mikroskopowe czy klasyczne badania filtracyjne. Umożliwia ona jednak trójwymiarową analizę struktury materiału [18, 21], a w ślad za tym mogłaby pozwolić na identyfikację mechanizmów kolmatacji.

W niniejszym artykule przeprowadzono analizę możliwości zastosowania technik obrazowania SEM i CT do oceny kolmatacji geosyntetyków. Głównymi celami artykułu były zatem:

- identyfikacja zmian właściwości filtracyjnych geowłókniny pod wpływem kolmatacji,
- ocena przydatności nowoczesnych technik obrazowania do jakościowej i ilościowej analizy stopnia kolmatacji geowłóknin.

2. Materiał i metodyka badań

Badania przeprowadzono dla geowłókniny igłowanej PP oznaczonej symbolem GTX A. Wyrób ten wybrano ze względu na szerokie zastosowanie tego typu geosyntetyków w systemach drenażowych, gdzie pełnią funkcję filtracyjną. Właściwości badanego materiału zestawiono w tabeli 1, a parametry geowłókniny określono zgodnie z obowiązującymi normami. Analizy przedstawione w niniejszym artykule

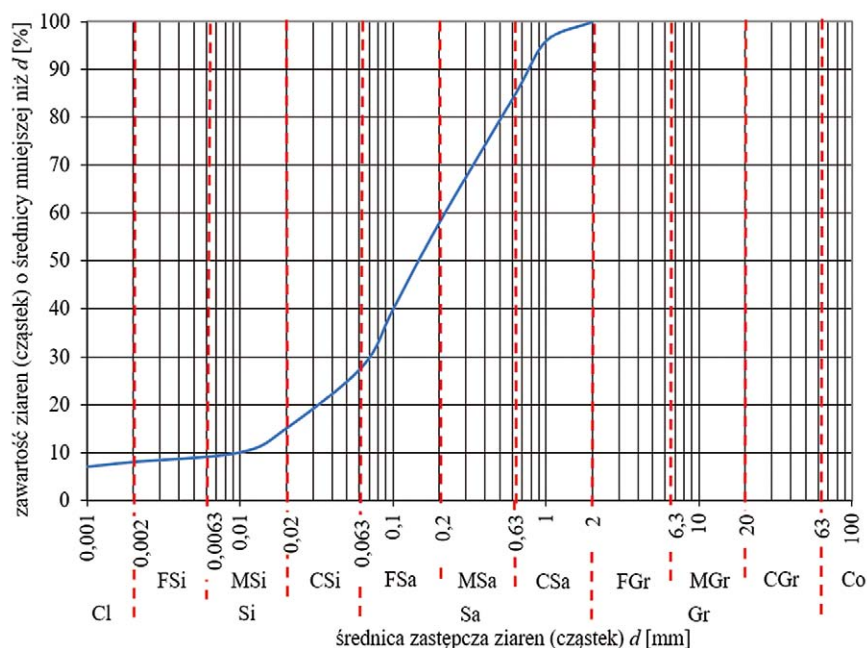


Tabela 1. Wybrane właściwości badanej geowłókniny

Parametr	GTX A
Masa powierzchniowa (g/m ²)	180
Grubość pod naciskiem 2 kPa (mm)	1,80
Wytrzymałość na rozciąganie w kierunku wzdłużnym (kN/m)	14
Wytrzymałość na rozciąganie w kierunku poprzecznym (kN/m)	14
Odporność na przebicie CBR (kN)	2,10
Odporność na przebicie dynamiczne (mm)	24
Charakterystyczny wymiar porów O_{90} (μm)	106
Wskaźnik prędkości przepływu (mm/s)	87

przeprowadzono w Slovenian National Building and Civil Engineering Institute w Ljublanje.

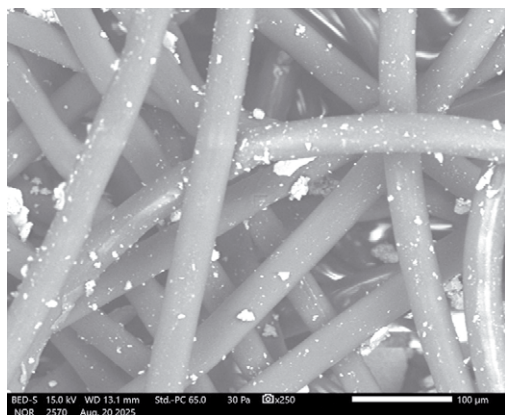
Geowłóknina została poddana procesowi kolmatacji w warunkach laboratoryjnych. Badania tego typu najczęściej przeprowadza się w układzie grunt-geowłóknina w urządzeniach pozwalających na skuteczne zakolmatowanie próbek materiałów geosyntetycznych. W tym przypadku proces kolmatacji mechanicznej wywołano w aparacie stosowanym do wyznaczenia wskaźnika gradientów GR zgodnie z metodą przedstawioną w normie ASTM D5101-12 [22] w kontakcie z piaskiem z iłem (clSa) (rys. 2).

Po procesie filtracji próbkę geowłókniny poddano badaniu wodoprzepuszczalności poprzecznej w celu określenia wpływu kolmatacji na jej właściwości hydrauliczne. Badanie polega na pomiarze objętości wody przepływającej w kierunku prostym do powierzchni próbki w określonym czasie i przy zadanej różnicy wysokości naporu hydraulicznego. Zgodnie z normą PN-EN ISO 11058:2019-07 [23] dla geowłóknin fabrycznie nowych różnice wysokości

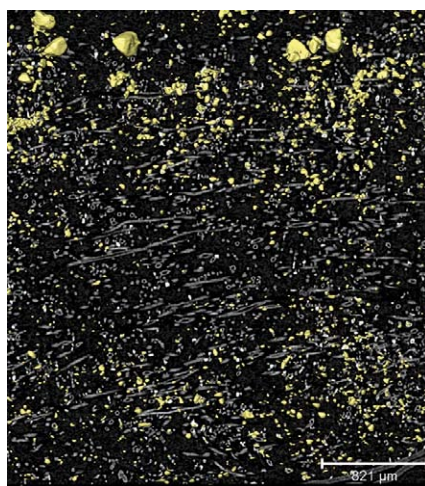
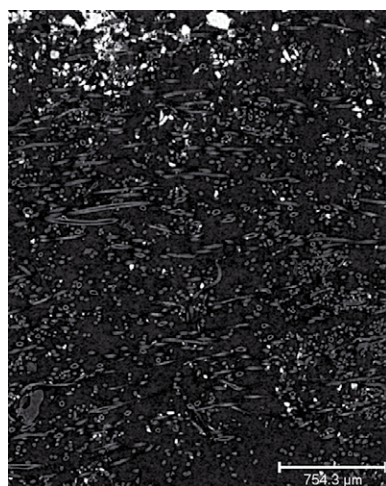
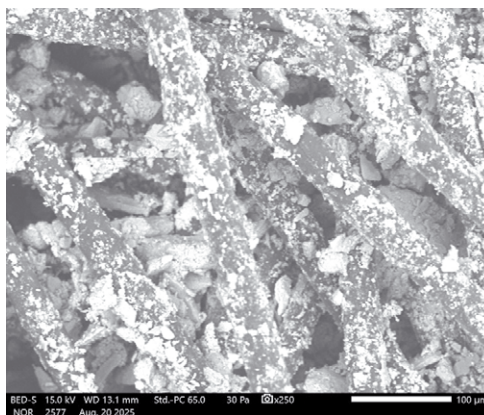
Tabela 2. Współczynnik przepuszczalności poprzecznej geowłókniny przed i po procesie kolmatacji

Współczynnik przepuszczalności poprzecznej (m/s)		
Próbka	Przed procesem kolmatacji	Po procesie kolmatacji
1	0,0071	0,0024
2	0,0075	0,0022
3	0,0073	0,0023
4	0,0074	0,0022
5	0,0074	0,0024
Średnia	0,00734	0,00230
Odchylenie standardowe	0,00015	0,00010
Współczynnik zmienności	2%	4%

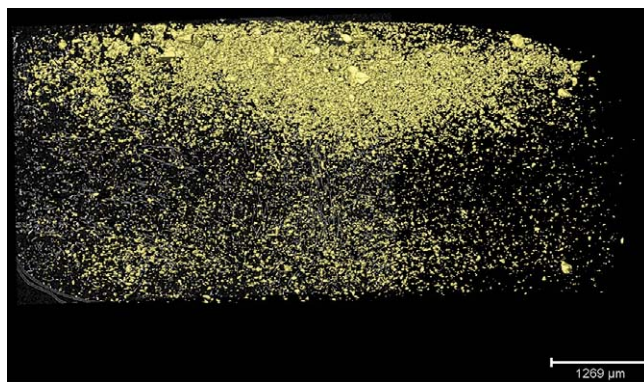
naporu hydraulicznego wynoszą kolejno: 70, 56, 42, 28 i 14 mm (metoda stałej wysokości naporu). W przypadku próbek zakolmatowanych (po eksploatacji) stosowanie dużych wartości naporu może prowadzić do niepożądanego „oczyszczenia próbek” i w konsekwencji do uzyskania błędnych wyników [6]. Dlatego zamiast wskaźnika prędkości przepływu wyznaczono współczynnik przepuszczalności poprzecznej przy różnicy wysokości naporu hydraulicznego wynoszącej 3 mm.



Rys. 3. Zdjęcia SEM geowłókniny przed i po procesie kolmatacji



Rys. 4. Zdjęcia CT geowłókniny przed i po procesie kolmatacji z uwzględnieniem włókien



Rys. 5. Zdjęcie CT geowłókniny po procesie kolmatacji ze szczególnym wskazaniem zakolmatowanych cząstek gruntowych

Ponadto, zarówno przed, jak i po procesie wymuszonej kolmatacji, wykonano zdjęcia przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego (JEOL JSM-IT500 z EDS) oraz zaawansowanej techniki obrazowania – tomografii komputerowej (microXCT400).

3. Wyniki badań

Zmianę współczynnika przepuszczalności poprzecznej geowłókniny w wyniku procesu kolmatacji przedstawiono w tabeli 2. Współczynnik ten

zmniejszył się trzykrotnie, co wskazuje na znaczny wpływ procesu kolmatacji na właściwości filtracyjne badanej geowłókniny. Wskaźnik kolmatacji badanej geowłókniny CF (ang. *Clogging Factor*) wynosił 69%. Należy podkreślić, że proces prowadzono w warunkach laboratoryjnych. To, czy badana geowłóknina mogłaby zostać wykorzystana w systemie

drenażowym, należałoby określić dokonując analizy odpowiednich kryteriów doboru geowłóknin na warstwy filtracyjne przy uwzględnieniu cech gruntu sąsiadującego. Zajście procesu kolmatacji potwierdzono również przy użyciu analizy obrazu. W przypadku SEM możliwa jest jedynie obserwacja powierzchni próbki lub przygotowanych przekrojów. Technika ta w mojej ocenie pozwala na wizualne potwierdzenie kolmatacji oraz wyznaczenie średnicy włókien geowłókniny, jednak nie umożliwia analizy całej struktury próbki w przekroju ani przeprowadzenia ilościowej oceny procesu kolmatacji. Zdjęcia wykonane Skaningowym

Mikroskopem Elektronowym przedstawiono na rysunku 3. Drobne cząstki widoczne na geowłókninie przed procesem filtracji stanowią powierzchniowe zanieczyszczenia próbki, powstałe np. podczas wycinania i przygotowania materiału. Po filtracji obraz jednoznacznie wskazuje na zakolmatowanie próbki.

Znacznie większe możliwości daje tomografia komputerowa, która pozwala na analizę struktury próbki w całej objętości. Obrazy uzyskane przy użyciu tej techniki, umożliwiające nie tylko wizualizację kolmatacji, lecz także ocenę rozkładu materiału w przekroju próbki przedstawiono na rysunkach 4 i 5. Kolorem żółtym oznaczono zakolmatowane wewnątrz geowłókniny cząstki gruntu.

Na szczególną uwagę zasługuje rysunek 5, który przedstawia rozmieszczenie zakolmatowanych cząstek gruntu w przekroju geowłókniny. Tomografia komputerowa okazuje się metodą znacznie lepszą zarówno do oceny jakościowej, jak i ilościowej procesu kolmatacji mechanicznej geosyntetyków. Ocena ilościowa wymaga zastosowania dodatkowego oprogramowania i będzie stanowiła dalszy etap badań omawianych w niniejszym artykule. Z analizy obrazu wynika, że znaczna część drobnych cząstek gruntu skoncentrowana jest w górnej części przekroju próbki. Rysunek 5 pozwala również jednoznacznie potwierdzić, że geowłóknina została zakolmatowana w kontakcie z piaskiem z iłem.

4. Podsumowanie

Geowłókniny, należące do grupy geosyntetyków, od około 60 lat z powodzeniem stosowane są w systemach drenażowych. Należy jednak podkreślić, że w kontakcie z gruntem mogą być narażone na niekorzystne procesy, w tym kolmatację. Mimo licznych badań zjawisko to wciąż nie zostało w pełni rozpoznane. Wynika to m.in. z rosnącej liczby produktów geosyntetycznych na rynku, zróżnicowanych zastosowań oraz odmiennych warunków gruntowych, w których te materiały są stosowane.

Oprócz tradycyjnych metod badawczych, jakościową ocenę kolmatacji geowłóknin umożliwiają techniki obrazowania. Wymagają one jednak zastosowania specjalistycznej aparatury oraz odpowiedniego przygotowania próbek, warunkującego reprezentatywność uzyskiwanych wyników.

Analizy przedstawione w niniejszym artykule mają charakter badań wstępnych, jednak uzyskane wyniki potwierdzają, że analiza obrazu, wsparta technikami SEM, a zwłaszcza CT, stanowi skuteczne narzędzie do rozpoznania zjawiska kolmatacji oraz może wspierać podejmowanie decyzji inżynierskich, mających na celu utrzymanie wydajności i niezawodności systemów drenażowych z wykorzystaniem geowłóknin. Badania w zakresie oceny ilościowej, znacznie trudniejsze, lecz jednocześnie bardziej pożądane z punktu widzenia inżynierskiego, stanowią dalszy etap prac.

BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-EN ISO 10318-1:2015-12/A1:2018-09: Geosyntetyki – Część 1: Terminy i definicje
- [2] Ishikawa T., Nakasone K., Ohkoshi Y., Hou K.K., Structure analysis of needle-punched nonwoven fabrics by X-ray computed tomography. *Textile Research Journal* 89, 2019, str. 20–31, <https://doi.org/10.1177/004051751773647>
- [3] Ding Z., Babar A. A., Wang C., Zhang P., Wang X., Yu J., Ding B., Spun-bonded needle-punched nonwoven geotextiles for filtration and drainage applications: Manufacturing and structural design, *Composites Communications* 25, 2021, art. 100481, <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100481>
- [4] Paul P., Tota-Maharaj K., Laboratory Studies on Granular Filters and Their Relationship to Geotextiles for Stormwater Pollutant Reduction, *Water* 7(4)2015, str. 1595–1609, <https://doi.org/10.3390/w7041595>
- [5] Markiewicz A., Koda E., Kawalec J., Geosynthetics for filtration and stabilisation: a review, *Polymers* 14, 2022, art. 5492, <https://doi.org/10.3390/polym14245492>
- [6] Miskowska A., Wpływ kolmatacji mechanicznej na warunki przepływu wody w filtrach geosyntetycznych, rozprawa doktorska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, 2020
- [7] Fannin R. J., Vaid Y. P., Shi Y. C., Filtration behavior of nonwoven geotextiles, *Canadian Geotechnical Journal* 31, 1994, str. 555–563
- [8] Moraci N., Geotextile filter: Design, characterization and factors affecting clogging and blinding limit states. *Proceedings of the 9th International Conference on Geosynthetics*; Guarujá, Brazil, 2010, str. 413–435
- [9] Koerner R. M., *Geotextiles: from design to applications*, tom 175, Woodhead Publishing, Cambridge, 2016
- [10] Markiewicz A., Kiraga M., Koda E., Influence of physical clogging on filtration performance of soil-geotextile interaction, *Geosynthetics International* 29, 4/2022, str. 356–368, <https://doi.org/10.1680/jgein.21.00039>
- [11] Correia L. G. C. S., Ehrlich M., Mendonca M. B., The effect of submersion in the ochre formation in geotextile filters. *Geotextiles and Geomembranes* 45, 2017, str. 1–7, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2016.08.001>
- [12] Ryoo S. C., Aydılek A. H., Hydraulic compatibility of geotextile-compost systems in landfill covers, *Geosynthetics International* 27(1)2020, str. 48–64, <https://doi.org/10.1680/jgein.19.00055>
- [13] Miskowska A., Lenart S., Koda E., Changes of Permeability of Nonwoven Geotextiles due to Clogging and Cyclic Water Flow in Laboratory Conditions, *Water* 9(9)2017, str. 660, <https://doi.org/10.3390/w9090660>
- [14] Giroud J. P., Development of criteria for geotextile and granular filters, [w:] *Proceedings of the 9th International Conference on Geosynthetics*, Guarujá, Brazil, 2010, str. 45–65
- [15] Du Ch., Xu Ch., Yang Y., Wang J., Filtration Performance of Nonwoven Geotextile Filtering Fine-Grained Soil under Normal Compressive Stresses, *Applied Sciences*, 12(24)2022, art. 12638, <https://doi.org/10.3390/app122412638>
- [16] PN-EN ISO 12956:2020-06: Geotekstylia i wyroby pokrewne – Wyznaczanie charakterystycznej wielkości porów
- [17] Aydılek A. H., Oguz S. H., Edil T. B., Constriction Size of Geotextile Filters. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 131(10)2005, str. 28–38
- [18] Li K.-Y., Tang X.-W., Zhao W.-F., Fei M.-L., Chen X.-L., Liang J.-X., Microstructure characteristics of nonwoven geotextiles using SEM and CT methods, *Geotextiles and Geomembranes* 51(2)2023, str. 293–302, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2022.11.003>
- [19] Veylon G., Stoltz G., Meriaux P., Faure Y.-H., Touze-Foltz N., Performance of geotextile filters after 18 years' service in drainage trenches. *Geotextiles and Geomembranes* 44, 2016, str. 515–533
- [20] Ratajczak E., Rentgenowska tomografia komputerowa (CT) do zadań przemysłowych, *Pomiary Automatyka Robotyka* 5, 2012, str. 104–113
- [21] Khan M. W., Dawson A. R., Marshall A. M., Chaudhry R., Measuring pore sizes of nonwoven geotextiles by X-ray CT images: a comparative evaluation, *Geosynthetics International* 32(4)2024, str. 531–543, <https://doi.org/10.1680/jgein.24.00055>
- [22] ASTM D5101-12. Standard Test Method for Measuring the Filtration Compatibility of Soil-Geotextile Systems
- [23] PN-EN ISO 11058:2019-07: Geotekstylia i wyroby pokrewne – Wyznaczanie charakterystyk wodoprzepuszczalności w kierunku prostopadłym do powierzchni wyrobu, bez obciążenia

Wpływ narzutu kamiennego na rozwój rozmycia dna w dolnym stanowisku budowli hydrotechnicznej

Influence of rock riprap on the development of bed scour downstream of a hydraulic structure

inż. Łukasz Pietrzyk, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, dr inż. Marta Kiraga (ORCID: 0000-0001-9729-4209), Instytut Inżynierii Lądowej, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7940

Streszczenie: Rozmycie dna w rejonie budowli hydrotechnicznych stanowi istotny problem eksploatacyjny, który może prowadzić do utraty stateczności budowli wodnych. W pracy przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych rozwoju rozmycia dna w dwóch wariantach: bez umocnienia oraz z narzutem kamiennym. Eksperymenty przeprowadzono w warunkach kontrolowanego przepływu dla różnych prędkości wody. Analizie poddano maksymalne głębokości rozmycia oraz ich zmienność statystyczną w obu wariantach. Wyniki wskazują, że narzut kamienny ogranicza rozwój rozmycia dna. Przeprowadzona analiza wskazuje na skuteczność tego typu zabezpieczenia dna w warunkach laboratoryjnych oraz może stanowić podstawę do potencjalnego zastosowania w praktyce projektowej, jednak wymaga to dalszej weryfikacji w warunkach rzeczywistych.

Słowa kluczowe: rozmycie dna, budowle hydrotechniczne, narzut kamienny, badania laboratoryjne.

Abstract: Bed scour in the vicinity of hydraulic structures is an important operational problem that may lead to loss of stability of the structure. This paper presents results of laboratory experiments on the bed scour development downstream of a hydraulic structure for two variants: without bed protection and with protection in the form of rock riprap. The experiments were carried out under controlled flow conditions with measurement series performed for different flow velocities. The analysis included maximum scour depths and their statistical variability for both experimental variants. The obtained results indicate that the application of rock riprap limits the development of the scour hole, reducing the maximum scour depth and the scour development rate. The analysis confirms the effectiveness of this type of bed protection under laboratory conditions and indicates its potential applicability in engineering design.

Keywords: bed scour, hydraulic structures, rock riprap, laboratory experiments.

1. Wprowadzenie

Rozmycie dna w rejonie budowli hydrotechnicznych stanowi istotny problem inżynierii wodnej. Proces ten występuje intensywnie w strefach koncentracji prędkości przepływu, takich jak dolne stanowiska progów, jazów i przepustów. W wyniku oddziaływania przepływu wody na materiał denny następuje lokalne pogłębianie się dna, prowadzące do powstania tzw. niecki rozmycia. Powstawanie niecki rozmycia jest zjawiskiem powszechnie obserwowanym w rejonie obiektów piętrzących, dlatego jego analiza ma istotne znaczenie w projektowaniu nowych obiektów hydrotechnicznych i w ocenie bezpieczeństwa eksploatacji istniejących konstrukcji.

Mechanizm rozmycia wynika ze wzrostu naprężeń stycznych i powstawania struktur wirowych. W początkowej fazie procesu dochodzi do intensywnej erozji materiału dennego, a następnie tempo pogłębiania dołu maleje [5, 6]. Z tego względu rozmycie traktowane jest jako proces dynamiczny, którego przebieg zależy od parametrów przepływu, właściwości materiału dna oraz geometrii konstrukcji [2, 3]. W praktyce stosuje się umocnienia dna w celu ograniczenia

rozwój rozmycia. Skuteczność takich rozwiązań zależy jednak od wielu czynników, w tym od intensywności przepływu, wielkości ziaren materiału dennego oraz charakteru oddziaływania strugi na podłoże [8–11]. Z tego względu istotne jest prowadzenie badań eksperymentalnych pozwalających na ilościową ocenę wpływu zastosowanych zabezpieczeń na rozwój niecki rozmycia.

Celem pracy jest ocena wpływu narzutu kamiennego na rozwój rozmycia dna. Badania przeprowadzono w dwóch wariantach eksperymentalnych: bez umocnienia dna dolnego stanowiska oraz z zastosowaniem umocnienia w postaci narzutu kamiennego. Na podstawie wyników pomiarów określono maksymalne głębokości rozmycia oraz przeprowadzono porównanie ich zmienności statystycznej dla obu wariantów eksperymentu. Pomimo licznych badań dotyczących procesów rozmycia dna w rejonie budowli hydrotechnicznych, brak jest spójnych i uniwersalnych zależności ilościowych dotyczących skuteczności narzutu kamiennego w warunkach kontrolowanych przepływów, szczególnie w odniesieniu do analizy zmienności statystycznej głębokości rozmycia w czasie [1, 6, 7, 9]. W niniejszej pracy wypełniono tę lukę badawczą poprzez

porównawczą analizę dwóch wariantów modelowych oraz ocenę nie tylko wartości maksymalnych rozmycia, ale również ich rozrzutu statystycznego w identycznych warunkach hydraulicznych. Uzyskane wyniki pozwalają na ocenę skuteczności zastosowanego rozwiązania ochronnego oraz mogą stanowić podstawę do formułowania wniosków dotyczących projektowania zabezpieczeń dna w rejonie budowli hydrotechnicznych pracujących w podobnych warunkach przepływu.

2. Metodyka

2.1. Laboratoryjny eksperyment badawczy

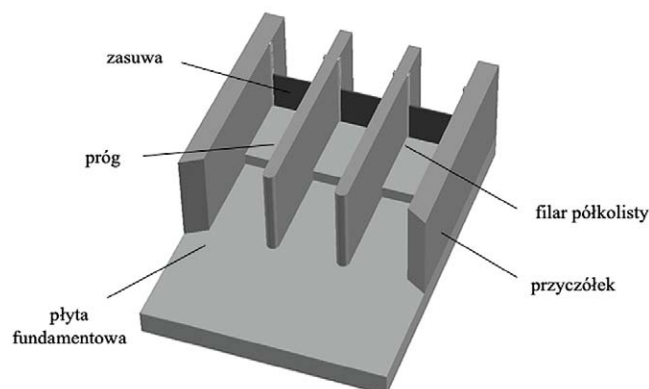
Eksperyment przeprowadzono na fizycznym modelu jazu (rys. 1). Badania realizowano przy założeniu braku dopływu rumowiska wleczonego do dolnego stanowiska. Dno w stanowisku dolnym i górnym było piaszczyste, a więc podatne na rozmycie, jednakże naprężenia styczne w górnym stanowisku były zbyt małe by zainicjować transport rumowiska. Model umieszczono w uchylnym korycie o wymiarach 0,6x9,0x0,7 m. Model miał przyczółki łączące konstrukcję z brzegami koryta. Budowla miała trzy światła o szerokości 0,14 m, które rozdzielały dwa filary wyposażone we wnętrza na regulowane zamknięcia zasuwowe (tab. 1). Niniejsze opracowanie ogranicza się do rozpatrzenia warunków przepływu nad zasuwą. Średnice charakterystyczne ziaren materiału gruntowego budującego dno wynosiły odpowiednio $d_{50} = 0,95$ mm oraz $d_{95} = 1,1$ mm. Umocnienie dolnego stanowiska wykonano w dwóch wariantach, na których prowadzono jednakową liczbę serii pomiarowych o ustalonych warunkach hydraulicznych.

W wariantcie W0 nie zastosowano umocnienia dna – strumień opuszczający budowlę trafiał bezpośrednio na piaszczyste dno rozmywalne (rys. 2a, 3a). Wyniki badań dla tego wariantu stanowiły punkt odniesienia do oceny skuteczności umocnienia dna. W wariantcie W1 zastosowano narzut kamienny jako umocnienie dna (rys. 2b, 3b).

Dla obu wariantów wykonano 11 serii pomiarowych trwających 6 godzin. Na początku każdego pomiaru regulowano poziom zwierciadła wody w pionie B-B (rys. 4a), znajdującym się w dolnym stanowisku budowli oraz natężenie przepływu w korycie, by odpowiadało założeniom serii pomiarowej (tab. 2 i 3). W obu wariantach warunki hydrauliczne dla serii o odpowiadających sobie numerach były takie same. Ponadto określano głębokość wody w stanowisku górnym w pionie A-A, obliczano średnie prędkości wody w przekrojach, oznaczonych w taki sam sposób, jak odpowiadające im piony, oraz określano liczbę Froude'a na podstawie tych prędkości. Wprowadzenie zasuw w modelu koryta laboratoryjnego spowodowało istotne zmiany w charakterze przepływu. W dolnym stanowisku, w którym dno wykonano z materiału piaszczystego, zaobserwowano lokalne rozmycia spowodowane intensyfikacją oddziaływania hydraulicznego na podłoże, to jest

wzrostem prędkości strumienia i koncentracją strug w strefie za przeszkodą (rys. 4b). Rozmycie dna rozwija się stopniowo w czasie. W pewnej odległości za odskokiem, gdy jego oddziaływania zaczynają się zmniejszać następuje stabilizacja tachoidy prędkości, a rozkład prędkości przyjmuje formę zbliżoną do niezaburzonego.

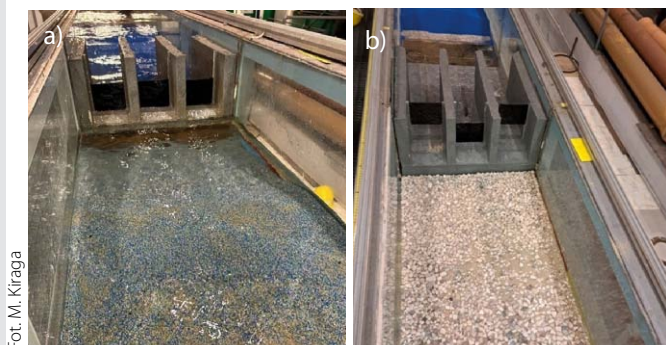
Kształt dna wyznaczano sondą talerzykową ($\pm 0,5$ mm). Przed rozpoczęciem każdego cyklu badawczego wykonywano pomiar zerowy, polegający na wyznaczeniu położenia wyrównanego dna koryta przed uruchomieniem przepływu wody przez model jazu. Stanowił on poziom odniesienia do dalszych analiz zmian ukształtowania dna. Następnie pomiary wykonywano w regularnej siatce punktów, obejmujących obszar bezpośrednio poniżej modelu jazu, gdzie intensywność rozmywania była największa. Na podstawie zebranych danych utworzono chmurę punktów 3D, która posłużyła do uzyskania przestrzennego kształtu dna oraz wyznaczenia maksymalnej głębokości lokalnego rozmycia dna. Zamontowany na tym samym przecie ruchomy wodowskaz szpilkowy o dokładności $\pm 0,5$ mm pozwalał na wykonywanie pomiaru wysokości zwierciadła wody w osi koryta.



Rys. 1. Trójwymiarowa wizualizacja modelu jazu (opracowanie własne)

Tabela 1. Wymiary elementów konstrukcyjnych modelu

L.p.	Element konstrukcyjny	Liczba	Wymiary		
			Szerokość	Długość/grubość	Wysokość
			[m]	[m]	[m]
1	filary półkoliste	2	0,035	0,5175	0,230
2	płyta fundamentowa	1	0,580	0,800	0,050
3	próg	3	0,140	0,220/0,250	0,030
4	przyczółek	2	0,045	0,545	0,230
5	światło	3	0,140	-	-
6	zasuwa	3	0,140	0,005	0,100



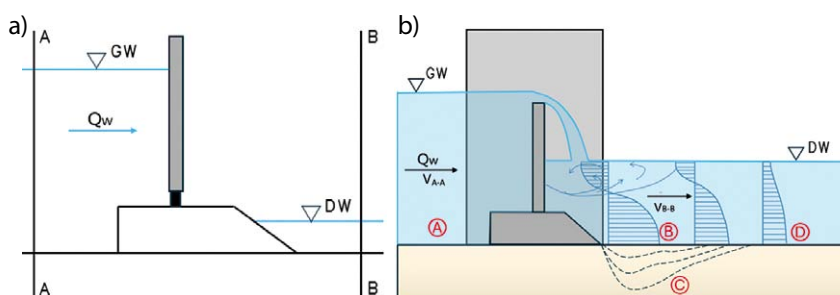
Fot. M. Kiraga

Rys. 2. Zabudowa dolnego stanowiska – stanowisko dolne: a) wariant 0, b) wariant 1



Fot. M. Naliwajko

Rys. 3. Zabudowa dolnego stanowiska – widok w planie: a) wariant 0, b) wariant 1



Rys. 4. Schemat pracy modelu, a) położenie pionów pomiarowych, b) strefy zjawisk hydraulicznych, gdzie GW – poziom wody górnej, DW – poziom wody dolnej, Q_w – natężenie przepływu wody, A-A – pion pomiarowy w stanowisku górnym, B-B – pion pomiarowy w stanowisku dolnym, A – stanowisko górne modelu jazu, B – strefa rozmywania, C – lokalne rozmycia dna, D – strefa nieobjęta zasięgiem odskoku hydraulicznego (opracowanie własne)

Tabela 2. Zestawienie parametrów hydraulicznych dla wariantu 0 bez umocnienia

Numer serii	Q_w [m ³ /s]	h_{A-A} [m]	h_{B-B} [m]	v_{A-A} [m/s]	v_{B-B} [m/s]	Fr_{A-A} [-]	Fr_{B-B} [-]
1	0,00850	0,176	0,040	0,083	0,366	0,063	0,585
2	0,01003	0,176	0,050	0,098	0,432	0,075	0,617
3	0,00844	0,175	0,049	0,083	0,364	0,063	0,525
4	0,01095	0,177	0,044	0,107	0,472	0,081	0,718
5	0,01194	0,170	0,049	0,117	0,515	0,091	0,742
6	0,01197	0,187	0,050	0,117	0,516	0,087	0,737
7	0,01211	0,170	0,046	0,119	0,522	0,092	0,777
8	0,00920	0,178	0,080	0,090	0,397	0,068	0,448
9	0,00920	0,170	0,040	0,090	0,397	0,070	0,633
10	0,00774	0,167	0,034	0,076	0,334	0,059	0,578
11	0,01205	0,187	0,050	0,118	0,519	0,087	0,742

gdzie: Q_w – natężenie przepływu wody [m³/s]; h_{A-A} , h_{B-B} – średnia głębokość wody w przekroju A-A, B-B [m]; v_{A-A} , v_{B-B} – średnia prędkość wody w przekroju A-A, B-B [m/s]; Fr_{A-A} , Fr_{B-B} – liczba Froude'a w stanowisku A-A, B-B [-].

3. Wyniki i dyskusja

Maksymalne głębokości rozmycia dna zmierzone w przekroju B-B po 6 godzinach trwania pomiaru przedstawiono w tabeli 4. Zaobserwowano wyraźną różnicę pomiędzy wartościami

dla obu wariantów (rys. 5a). W wariantach bez umocnień osiągnięto rozmycia Z_{maxW0} o głębokości od 0,2421 do 0,3365 m. Odchylenie standardowe maksymalnej głębokości rozmycia wynosiło 0,032 m, co odpowiada współczynnikowi zmienności na poziomie około 11%. Oznacza to, że rozwój rozmycia był w dużym stopniu determinowany przez zadane parametry przepływu, natomiast wpływ czynników losowych związanych z lokalnym transportem rumowiska był stosunkowo niewielki.

Wartości głębokości rozmycia dla wariantu zabudowy dna dolnego stanowiska narzutem kamiennym Z_{maxW1} sięgały od 0,0117 do 0,0813 m. Średnia wartość maksymalnej głębokości rozmycia dla wszystkich eksperymentów wyniosła 0,038 m. Odchylenie standardowe wynosi 0,022 m, a współczynnik zmienności jest znacznie wyższy i wynosi 57%. Relatywnie wysoka wartość współczynnika zmienności wynika przede wszystkim z niewielkich bezwzględnych wartości średniej głębokości rozmycia. W takich przypadkach nawet stosunkowo małe różnice pomiędzy poszczególnymi pomiarami prowadzą do znacznego wzrostu wartości współczynnika zmienności. Procentową skuteczność działania umocnienia, obliczaną jako redukcja mierzonych głębokości w wariantach z umocnieniem względem wariantu bez umocnień przedstawiono w tabeli 4 i na rysunku 5b:

$$R = \frac{Z_{maxW0} - Z_{maxW1}}{Z_{maxW0}} \quad (1)$$

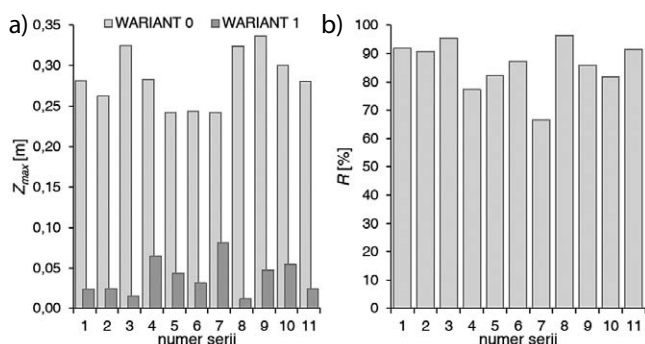
Największe różnice maksymalnych głębokości rozmyć pomiędzy wartościami uzyskiwanymi w wariantach 1 i wariantach 0 zabudowy, wynoszące 0,31 m uzyskano dla 8 serii

Tabela 3. Zestawienie parametrów hydraulicznych dla wariantu 1: umocnienia kamiennego

Numer serii	Q_w [m ³ /s]	h_{A-A} [m]	h_{B-B} [m]	v_{A-A} [m/s]	v_{B-B} [m/s]	Fr_{A-A} [-]	Fr_{B-B} [-]
1	0,00850	0,180	0,040	0,081	0,366	0,061	0,585
2	0,01003	0,185	0,050	0,096	0,432	0,071	0,617
3	0,00844	0,179	0,049	0,081	0,364	0,061	0,525
4	0,01095	0,192	0,044	0,105	0,472	0,076	0,718
5	0,01194	0,192	0,049	0,114	0,515	0,083	0,742
6	0,01197	0,195	0,050	0,115	0,516	0,083	0,737
7	0,01211	0,190	0,046	0,116	0,522	0,085	0,777
8	0,00920	0,178	0,080	0,088	0,397	0,067	0,448
9	0,00920	0,180	0,040	0,088	0,397	0,066	0,633
10	0,00774	0,175	0,034	0,074	0,334	0,057	0,578
11	0,01205	0,192	0,050	0,115	0,519	0,084	0,742

pomiarowej. Odpowiada to zmniejszeniu głębokości rozmycia aż o 96,4% względem większej wartości. W poszczególnych seriach pomiarowych redukcja ta mieściła się w przedziale od około 66 do ponad 96%. Średnio rozmycie w porównaniu z wariantem nieumocnionym było płytsze o 86% przy zastosowaniu narzutu kamiennego.

Ponadto zbadano zależność głębokości lokalnego rozmycia Z_{max} od średniej prędkości wody w przekroju B-B dla obu analizowanych wariantów. Widoczne jest jednak, że współczynniki korelacji są rozbieżne, dla wariantu 0 wynosi on -0,74, a dla wariantu 1 współczynnik wynosi 0,32 (rys. 6a). W wariancie bez umocnień zależność ma charakter odwrotnie proporcjonalny, a korelacja między zmiennymi jest silna, natomiast w wariancie z umocnieniami kamiennymi ma charakter wprost proporcjonalny, a korelacja może być określona jako słaba, co dodatkowo potwierdza brak jednoznacznej relacji.



Rys. 5. Maksymalne głębokości lokalnego rozmycia uzyskiwane w trakcie badań laboratoryjnych; a) porównanie wartości głębokości lokalnego rozmycia uzyskanych dla analizowanych wariantów zabudowy dolnego stanowiska modelu jazu, b) redukcja głębokości lokalnego rozmycia dzięki zastosowaniu umocnienia kamiennego (wariant 1) (opracowanie własne)

W efekcie nie można mówić o bezpośredniej, silnej korelacji między prędkością przepływu, a głębokością rozmycia dla przedstawionych danych. Rozkład maksymalnych głębokości rozmycia dna w przekroju B-B dla obu analizowanych wariantów w postaci wykresów pudełkowych przedstawia rysunek 6b. W przypadku wariantu bez umocnienia dna (W0) mediana rozmycia znajduje się w przybliżeniu na poziomie około 0,29–0,30 m. Relatywnie niewielki rozstęp międzykwartylowy wskazuje na stosunkowo dobrą powtarzalność wyników. Odmienne charakter rozkładu obserwuje się dla wariantu z umocnieniem dna narzutem kamiennym (W1). Zarówno mediana, jak i cały zakres wartości maksymalnych głębokości rozmycia są w tym przypadku wielokrotnie mniejsze. Mediana rozmycia wynosi około 0,03–0,04 m, jednocześnie widoczny jest wyraźnie większy względny rozrzut wyników, co potwierdza wcześniejszą analizę współczynnika zmienności.

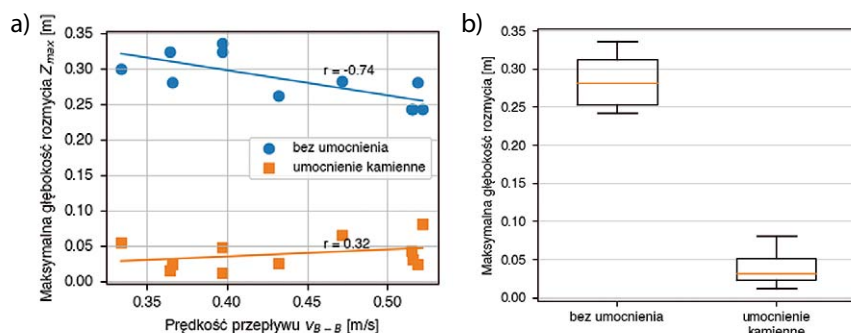
Uzyskane w niniejszej pracy wyniki są zgodne z obserwacjami przedstawionymi w literaturze dotyczącej rozwoju lokalnego rozmycia w rejonie budowli hydrotechnicznych. W szczególności w pracach [5 i 9] wskazano, że proces rozmycia ma charakter silnie nieliniowy i zależy od lokalnych warunków hydraulicznych oraz geometrii przepływu. Podobne wnioski przedstawiono w [1], gdzie wskazano na brak uniwersalnych zależności ilościowych dla rozwoju rozmycia poniżej budowli piętrzących.

Tabela 4. Głębokość rozmycia dna Z_{max} [m] dla analizowanych wariantów zabudowy dolnego stanowiska budowli

Numer serii	Z_{maxW0}	Z_{maxW1}	ΔZ_{max}	R
	[m]	[m]	[m]	(%)
1	0,2812	0,0232	0,2580	91,7
2	0,2621	0,0245	0,2376	90,7
3	0,3245	0,0154	0,3091	95,3
4	0,2832	0,0644	0,2188	77,3
5	0,2423	0,0432	0,1991	82,2
6	0,2433	0,0312	0,2121	87,2
7	0,2421	0,0813	0,1608	66,4
8	0,3243	0,0117	0,3126	96,4
9	0,3365	0,0476	0,2889	85,9
10	0,3003	0,0544	0,2459	81,9
11	0,2808	0,0243	0,2565	91,4

gdzie: Z_{maxW0} , Z_{maxW1} – maksymalne głębokości lokalnego rozmycia uzyskiwane dla wariantu 0 i 1 [m]; ΔZ_{max} – różnica między maksymalnymi głębokościami lokalnego rozmycia dla obu analizowanych wariantów [m]; R – redukcja maksymalnej głębokości lokalnego rozmycia dzięki zastosowaniu umocnienia [%].

Rys. 6. Maksymalna głębokość rozmycia w funkcji prędkości przepływu oraz rozkład wartości rozmycia: a) zależność między prędkością przepływu a głębokością rozmycia, b) porównanie rozkładów maksymalnych głębokości rozmycia dla analizowanych wariantów (opracowanie własne)



4. Podsumowanie

Badania modelowe umożliwiają ocenę zachowania obiektów hydrotechnicznych. W niniejszej pracy umożliwiły one ilościową ocenę wpływu narzutu kamiennego na rozwój lokalnego rozmycia dna w warunkach porównywalnych serii pomiarowych, co stanowi podstawę do analizy skuteczności tego typu zabezpieczenia w ujęciu statystycznym. Badania laboratoryjne przeprowadzono w celu określenia rozwoju lokalnego rozmycia dna poniżej budowli hydraulicznej oraz oceny skuteczności zastosowanego umocnienia kamiennego. W ramach eksperymentu wykonano jedenaście serii pomiarowych dla dwóch wariantów dna: wariantu bez umocnienia oraz wariantu z umocnieniem kamiennym. W obu przypadkach eksperymenty prowadzono przy takich samych parametrach hydraulicznych oraz jednakowym czasie trwania pomiaru wynoszącym 6 godzin. Podczas badań kontrolowano natężenie przepływu wody, głębokości wody w przekrojach pomiarowych oraz średnie prędkości przepływu w stanowisku górnym i dolnym. Prędkości przepływu w przekroju dolnym mieściły się w zakresie od około 0,33 do 0,52 m/s. Odpowiadające im wartości liczby Froude'a wskazują, że przepływ odbywał się w warunkach spokojnych. Nowym elementem przeprowadzonych badań jest bezpośrednie porównanie dwóch wariantów dna w identycznych warunkach hydraulicznych oraz analiza nie tylko wartości maksymalnych rozmycia, ale również ich zmienności statystycznej. Badania wykazały, że zastosowanie umocnienia kamiennego może ograniczać głębokość lokalnego rozmycia dna. Istotnym wynikiem jest jednak określenie skali tej redukcji oraz jej zmienności w zależności od warunków przepływu, co pozwala na bardziej szczegółową ocenę skuteczności tego rozwiązania niż w przypadku prostych analiz wartości maksymalnych. Narzut kamienny zmniejszył głębokość rozmycia średnio o 86%, co wskazuje na wysoką skuteczność takiego rozwiązania w warunkach laboratoryjnych. Oznacza to, że umocnienie kamienne w analizowanych warunkach hydraulicznych prowadziło do redukcji głębokości rozmycia średnio około sześciokrotnie. Można zatem wnioskować, że umocnienia kamienne istotnie ograniczają głębokość lokalnego rozmycia i mogą pełnić funkcję ochronną dna przed erozją denną w warunkach modelowych. W przypadku dna nieumocnionego (wariant 0) można zauważyć ogólną tendencję wzrostu głębokości rozmycia wraz ze wzrostem prędkości przepływu, choć zależność ta nie ma charakteru ściśle liniowego. Wynikać może to z faktu, że rozwój rozmycia jest

procesem złożonym, zależnym nie tylko od wartości średniej prędkości przepływu, lecz również od m.in. głębokości wody oraz geometrii powstającej niecki rozmycia, a w efekcie rozkładu naprężeń stycznych na dnie formującego się wyboju. W wariancie 1 z umocnieniem kamiennym zależność między prędkością przepływu a głębokością rozmycia jest znacznie słabsza. Uzyskane wyniki wskazują, że analiza zmienności statystycznej może stanowić istotne uzupełnienie klasycznych metod oceny rozmycia, które opierają się głównie na wartościach maksymalnych, pomijając charakter rozrzutu wyników. Wyniki stanowią podstawę do dalszych badań i weryfikacji terenowej. Kierunek ten wydaje się interesujący, szczególnie pod względem rosnącego znaczenia rozwiązań opartych na materiałach naturalnych, które są postrzegane jako trwałe, ekologiczne oraz zgodne z zasadami zrównoważonego rozwoju. Szczególnie istotnym aspektem dalszych prac jest weryfikacja uzyskanych zależności w skali prototypowej oraz rozwój metod uwzględniających zmienność procesu rozmycia, co może przyczynić się do bardziej wiarygodnego projektowania zabezpieczeń hydrotechnicznych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bormann N. E., Julien P. Y. Scour downstream of grade-control structures. *Journal of Hydraulic Engineering* 134(8)(2008), str. 1036–1047
- [2] Breusers H. N. C., Raudkivi A. J., Scouring. *Hydraulic Design Considerations*. Hydraulic Structures Design Manual. London & New York: Association For Hydraulic Research Association 2, Taylor & Francis Group, 1991
- [3] Ghani A. A., Mohammadpour R., Temporal variation of clear-water scour at compound abutments, *Ain Shams Engineering Journal* 7(4)2016, str. 1045–1052
- [4] Graf W. H., *Fluvial hydraulics: flow and transport processes in channels of simple geometry*, John Wiley & Sons, 1998
- [5] Guan D., Liu J., Chiew Y.-M., Zhou Y. Scour evolution downstream of submerged weirs in clear water scour conditions, *Water* 11(9)2019, str. 1–19, <https://doi.org/10.3390/w11091746>
- [6] Kiraga M., Bajkowski S., Urbański J., Siwicki P. Experimental studies on the local scour development of the riverbed below the Piaseczno Weir, *Water* 17(13)2025, art. 1916, <https://doi.org/10.3390/w17131916>
- [7] Melville B. W., Chiew Y. M., Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 125, 1999, str. 59–65
- [8] Melville B. W., Coleman S. E., *Bridge Scour*. Highlands Ranch, CO, USA: Water Resources Publications, 2000
- [9] Pagliara S., Kurdistani S. M., Scour downstream of cross-vane structures. *Journal of Hydro-environment Research* 7(4)2013, str. 236–242, <https://doi.org/10.1016/j.jher.2013.02.002>
- [10] Pagliara S., Radecki-Pawlik A., Palermo M., Plesiński K., Block ramps in curved rivers: morphology analysis and prototype data supported design criteria for mild bed slopes. *River Research and Applications* 33, 2016, str. 427–437, <https://doi.org/10.1002/rra>
- [11] Siwicki P., Urbański J., Local scour below water structures and their influence on environment, *Acta Scientiarum Polonorum, Architectura* 3(2)2004, str. 113–120

Obiekty mostowe ważnym elementem leśnej infrastruktury drogowej

Bridge structures as a significant part of forest road infrastructure

dr inż. Tomasz Wierzbicki (ORCID: 0000-0002-4310-8789), Instytut Inżynierii Lądowej, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7941

Streszczenie: Niemal jedną trzecią powierzchni Polski stanowią tereny zalesione. Większość tych terenów stanowią obszary zarządzane przez Państwowe Gospodarstwo Leśne Lasy Państwowe, którego jednym z głównych celów, oprócz urządzania lasu i dbania o odpowiednią strukturę zalesienia, jest pozyskiwanie drewna. Oznacza to, że gospodarstwo zmuszone jest do utrzymywania sieci dróg wraz z infrastrukturą inżynierską do transportu sprzętu leśnego oraz pozyskanego drewna. Drogi te pełnią także rolę szczególną w przypadku sytuacji nadzwyczajnych np. pożarów. Na obszarze niemal 9,5 mln ha znajduje się ponad 106 000 km dróg oraz niemal cztery tysiące obiektów mostowych, nie licząc przepustów. Ze względu na specyfikę środowiska oraz występujące obciążenia eksploatacyjne, utrzymanie obiektów mostowych stanowiących istotne elementy sieci drogowej, jest zadaniem trudnym, a problemy, z którymi boryka się administracja leśna, są odmienne od zadań realizowanych przez administrację obiektów na drogach publicznych. W artykule poruszono zagadnienia związane ze skalą, utrzymaniem oraz obciążeniem obiektów mostowych znajdujących się na krajowej sieci dróg leśnych administrowanych przez Państwowe Gospodarstwo Leśne Lasy Państwowe.

Słowa kluczowe: drogi leśne, obiekty mostowe, utrzymanie, Lasy Państwowe.

Abstract: Almost one third of Poland's area is forested. Most of these areas are managed by the State Forests National Forest Holding, one of whose main goals, apart from forest management and taking care of the appropriate afforestation structure, is timber harvesting. This means that the Holding is forced to maintain a network of roads along with the engineering infrastructure for transporting forestry equipment and timber acquired. These roads also play a special role in the event of emergency situations, such as fires. On an area of almost 9,5 mln ha, there are over 106 000 km of roads and almost four thousand bridge structures. Due to the specific nature of the environment and the live loads applied on structures, maintaining bridge structures, which are important elements of the road network, is a difficult task, and the problems faced by the forest administration are different from the tasks carried out by the administrations of facilities on public roads. The article discusses issues related to the scale, maintenance and load of bridge structures located on the national network of forest roads administered by the State Forests National Forest Holding.

Keywords: forest roads, bridge structures, maintenance, State Forests.

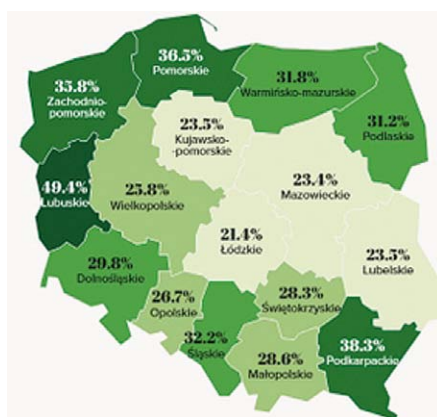
1. Wprowadzenie

Polska należy do krajów, powierzchnia których w znacznym stopniu pokryta jest lasami. Na całkowitą powierzchnię kraju, wynoszącą około 31 393 tys. ha, przypada aż 9484 tys. ha lasów [1]. Zatem niemal jedna trzecia powierzchni kraju pod względem transportowym wyłączona jest z użytkowania w ogólnodostępnym systemie drogowym. Z drugiej strony intensywna gospodarka leśna wymaga sprawnych systemów transportowych zapewniających transport maszyn i urządzeń w jednym kierunku i transportów drewna w drugim. Z danych udostępnianych przez Państwowe Gospodarstwo Leśne Lasy Państwowe (PGLLP) [2] wynika, że z kolei niemal 77% z ogólnej powierzchni lasów w Polsce znajduje się w zarządzie Lasów Państwowych, co czyni gospodarstwo najważniejszym użytkownikiem leśnej infrastruktury drogowej, nakładając na nie jednocześnie obowiązki jej utrzymywania i budowy. Według

dostępnych danych sieć dróg leśnych liczy ponad 100 tys. km [3] i jest rozłożona adekwatnie do potrzeb, czyli w zależności od stopnia zalesienia obszaru. Nasycenie siecią dróg leśnych z grubsza oddaje poniższa mapa opublikowana przez Lasy Państwowe [2] przedstawiona na rysunku 1.

Do prawidłowego funkcjonowania sieci drogowej, oprócz samej odpowiednio nośnej i prawidłowo utrzymanej drogi, niezbędna jest obecność innych elementów infrastruktury, z których jak się wydaje najważniejsze są konstrukcje inżynierskie, w tym obiekty mostowe. Cała leśna infrastruktura drogowa pracuje w szczególnie niekorzystnych warunkach, ze względu na trudne warunki utrzymaniowe, jak i znaczne, niekontrolowane obciążenia wynikające ze specyfiki transportu leśnego. Z tego względu niezwykle ważnym czynnikiem, stanowiącym o sprawności systemu transportowego, jest istnienie procedur zapewniających prawidłowy stan techniczny i odpowiednią nośność obiektów mostowych stanowiących kluczowy element

Rys. 1. Mapa zalesienia obszaru Polski w podziale na województwa wraz z podziałem kraju na Regionalne Dyrekcje Lasów Państwowych [2]



systemu drogowego. Na potrzeby przeglądu aktualnego rozwiązania tej kwestii przeprowadzono analizy dotyczące zarówno stosowanej praktyki, jaki efektów uzyskanej na podstawie jej stosowania. Na podstawie analizy konkretnego obiektu wykazano, że istniejący system oceny stanu obiektu daje fałszywie pozytywną ocenę, nie oddającą rzeczywistego stanu technicznego obiektu.

2. Obiekty mostowe w gospodarce leśnej

Struktura organizacyjna Lasów Państwowych przewiduje podział kraju na Regionalne Dyrekcje Lasów Państwowych, nie do końca pokrywające się z zasięgiem województw, ale odpowiadające potrzebom gospodarki leśnej. W strukturze znajduje się siedemnaście dyrekcji, a ich siedziby znajdują się w Białymstoku, Lublinie, Krośnie, Olsztynie, Warszawie, Radomiu, Krakowie, Katowicach, Łodzi, Toruniu, Gdańsku, Koszalinie, Szczecinku, Pile, Szczecinie, Zielonej Górze, Poznaniu i Wrocławiu. Podział terytorium kraju na obszary zarządzane przez poszczególne RDLP przedstawiono na rysunku 1. W dalszym podziale występują nadleśnictwa w liczbie 428, przy czym ich dystrybucja jest nierównomierna, tzn. w najbardziej rozbudowanej Dyrekcji znajduje się 38 nadleśnictw (RDLP Katowice), a w najmniejszej 14 (RDLP Warszawa). Dokładną liczbę nadleśnictw w poszczególnych Dyrekcjach Regionalnych przedstawiono w tabeli 1. Niższym szczeblem organizacyjnym są leśnictwa, ale to nadleśnictwa są odpowiedzialne za budowę i utrzymanie infrastruktury drogowej.

Według danych udostępnionych przez Lasy Państwowe na terenie przez nie zarządzanym znajduje się 3876 obiektów mostowych (wyłącznie mostów i wiaduktów) o zróżnicowanej rozpiętości i o zróżnicowanym stanie technicznym. Podział ilościowy obiektów mostowych przypadających na poszczególne dyrekcje przedstawiono w tabeli 1.

Już pobieżna analiza danych zawartych w tabeli 1 pokazuje, że problematyka budowy i utrzymania drogowych obiektów mostowych nie jest jednakowym obciążeniem w poszczególnych nadleśnictwach. Należy przy tym pamiętać, że podstawowym zadaniem służby leśnej jest hodowla lasu i pozyskiwanie drewna, zatem działalność związana z utrzymaniem sieci drogowej jest działalnością poboczną i siłą rzeczy aktywność na tym polu jest ograniczona do niezbędnej konieczności.

Z informacji w dostępnych źródłach, obejmujących zasoby biblioteczne, publikacje Lasów Państwowych, ogłoszenie o przetargach itp., należy domniemywać, że administracja terenów leśnych nie opracowała własnych standardów oceny stanu technicznego obiektów. Dostępne jest wydawnictwo PGLLP z roku 2013

Tabela 1. Dystrybucja obiektów mostowych na poszczególne Dyrekcje Regionalne LP

L.p.	Dyrekcja	Liczba obiektów	Liczba nadleśnictw
1	RDLP Katowice	597	38
2	RDLP Wrocław	596	33
3	RDLP Warszawa	444	14
4	RDLP Lublin	228	25
5	RDLP Łódź	224	19
6	RDLP Toruń	223	27
7	RDLP Białystok	220	31
8	RDLP Krosno	211	26
9	RDLP Kraków	202	16
10	RDLP Gdańsk	194	15
11	RDLP Szczecinek	191	30
12	RDLP Olsztyn	130	32
13	RDLP Zielona Góra	114	20
14	RDLP Szczecin	108	34
15	RDLP Poznań	98	25
16	RDLP Piła	79	20
17	RDLP Radom	17	23

– Wytyczne prowadzenia robót drogowych w lasach Jednakże praca ta poświęcona jest głównie zagadnieniu budowy i utrzymania dróg leśnych, obiektom mostowym poświęcając niewiele miejsca. W rozdziale poświęconym utrzymaniu obiektów mostowych, autorstwa prof. Arkadiusza Madaja podano dość ogólne informacje dotyczące zagadnienia utrzymania obiektów mostowych w ogóle, bez wskazania szczególnych warunków budowy i eksploatacji drogowej infrastruktury leśnej.

Przytoczono także ogólne procedury oceny stanu technicznego przygotowane w oparciu o metodykę wprowadzoną przez Generalną Dyrekcję Dróg Krajowych i Autostrad, i obejmujące sześć stopni stanu technicznego konstrukcji [4].

Natomiast w najnowszym opracowaniu NDLP [5] informacje dotyczące budowy i utrzymania obiektów zostały jeszcze bardziej skondensowane i nie stanowią wystarczającego opracowania w zakresie gospodarki mostowej.

Opracowanie to porusza zagadnienie nośności obiektów mostowych, ale jedynie w zakresie identyfikacji elementów, które mogłyby wpłynąć na jej ograniczenie. O kontrolach stanu technicznego wspomniana się rozdziale V „Utrzymanie dróg”. Z dostępnych raportów przeglądów oraz ogłoszeń przetargowych, w których poszczególne nadleśnictwa zlecają wykonanie przeglądów stanu technicznego zgodnie z wymogami Prawa Budowlanego [7], wynika, że w istocie wymagane jest stosowanie

wymienionych wyżej wytycznych [4]. Jednocześnie w materiałach PGLLP oceniających stan techniczny obiektów mostowych oraz stanowiących podstawę do podejmowania działań naprawczych i zapobiegających zastosowano odmienną metodykę, wzorowaną na ocenie stanu technicznego nawierzchni dróg, gdzie ich stan podlega ocenie wizualnej.

- Stan techniczny dobry – nawierzchnia bez ubytków lub z ubytkami nieznacznymi, przejezdna bez względu na warunki atmosferyczne, prawidłowo odwadniana i wyprofilowana. Wymaga jedynie zabiegów utrzymujących stan pierwotny oraz zapewniających prawidłowe funkcjonowanie drogi.
- Stan techniczny zadowalający – nawierzchnia z ubytkami do 30% powierzchni, przejezdna, wymagająca wykonania prac konserwacyjnych dot. profilowania poboczy lub nawierzchni. W przypadku elementów odwadniających utrzymanie sprowadza się do prac realizowanych punktowo lub na określonych odcinkach.
- Stan techniczny średni – nawierzchnia z ubytkami 30–50% powierzchni lub przejezdność uzależniona od warunków atmosferycznych, wymaga wykonania prac remontowych lub przywrócenia drożności i sprawności istniejącego systemu odwodnienia.
- Stan techniczny zły – nawierzchnia z ubytkami nawierzchni powyżej 50% lub nieprzejezdna, konieczny remont w celu odtworzenia pierwotnej nośności drogi lub jej przebudowa. Z punktu widzenia inżyniera mostowego jest to niewłaściwa metodyka oceny stanu technicznego, ponieważ zawężenie klasyfikacji obiektów wyłącznie do stanu nawierzchni nie pozwala na wychwycenie, w momencie tworzenia strategii inwestycyjnych najważniejszych parametrów obiektów mostowych, tj. nośności i trwałości. Te dwa parametry w sposób jednoznaczny określają warunki bezpiecznej eksploatacji obiektu. W dalszej części niniejszego artykułu zostanie dokonana praktyczna ocena takiej praktyki na podstawie dokumentacji obiektu mostowego w ciągu drogi leśnej nr inw. 242/267, nad potokiem Stryszawka, w Leśnictwie Roztoki, w miejscowości Stryszawa (Nadleśnictwo Sucha).

3. Specyfika drogowych obiektów mostowych w infrastrukturze leśnej

Znaczenia obiektów mostowych w każdym systemie sieci drogowej, nie wyłączając leśnej, nie sposób przecenić. Zwłaszcza że w przypadku systemu transportu leśnego, obiekty te pełnią istotną funkcję nie tylko w codziennym funkcjonowaniu lasu gospodarczego, ale stanowią elementy infrastruktury krytycznej w wypadku sytuacji nadzwyczajnych np. pożaru czy poszukiwań, kiedy do akcji skierowane są pojazdy o znacznej masie całkowitej i wysokim obciążeniu pojedynczej osi. Chodzi tu o bojowe pojazdy Straży Pożarnej, transportującej środki gaśnicze czy pojazdy specjalne wojska i policji w drugim przypadku. Także codzienne funkcjonowanie służb leśnych obejmujące transport drewna i maszyn do ścinki drzew stanowi istotne wykorzystanie lub przekroczenie nośności obiektów. Na przykład z danych udostępnionych przez producentów sprzętu np. KONRAD

Forsttechnik GmbH, dotyczących HIGHLANDER wheel harvester wynika, że całkowity ciężar dwuosiowego pojazdu przekracza 220 kN, a zamontowanie osprzętu może znacznie zwiększyć nacisk na pojedynczą oś. Badania prowadzone w Szkole Głównej Gospodarstwa Wiejskiego dotyczące nośności dróg i obciążeń przez nie przenoszonych wykazały znaczne, systematyczne przekraczanie dopuszczalnych nacisków na oś pojazdu [8]. Podobne wnioski zostały sformułowane w raportach pokontrolnych Najwyższej Izby Kontroli [11, 12]. W raportach tych wprost stwierdzono, że dopuszczone do ruchu na skutek błędnych (zaniżonych) pomiarów przeciążone pojazdy powodują degradację dróg, szczególnie dróg dojazdowych do lasów, po których głównie odbywa się transport drewna. NIK zwraca też uwagę, że problem przewozu drewna z lasów był wskazywany przez wypowiadające się w ankietach jednostki samorządu terytorialnego, jako jeden z głównych powodów wpływających na degradację dróg gminnych i powiatowych [11] oraz obowiązujące od 2012 r. przepisy prawne dotyczące przewozu drewna (ustawa Prawo o ruchu drogowym i wydane na jej podstawie rozporządzenie w sprawie gęstości drewna) nie dawały efektywnych możliwości eliminowania z ruchu drogowego pojazdów przeciążonych, zagrażających bezpieczeństwu oraz degradujących infrastrukturę drogową. Pojazdy przewożące drewno przekraczały dopuszczalną masę całkowitą nawet o 40–50% [9]. W tym wypadku za znaczne przeciążanie pojazdów odpowiada ustawowy sposób obliczania masy drewna, który nakazuje mnożenie oszacowanej kubatury przewożonego drewna przez tabelaryczny ciężar jednostkowy drewna [9, 10], zdaniem inspektorów NIK znacznie zaniżony w stosunku do wartości rzeczywistych. Zakładając, że wymienione wcześniej sytuacje występują przed włączeniem się pojazdów do systemu dróg publicznych, należy przyjąć, że przeciążenie leśnych drogowych obiektów mostowych, w znacznej mierze projektowanych według starych, znacznie łagodniejszych norm [13, 14] stanowi istotny problem utrzymaniowy. Ponadto obiekty te znajdują się w nieprzyjaznych warunkach środowiskowych sprzyjających gromadzeniu się zanieczyszczeń pochodzenia organicznego czy występowaniu wilgoci, a oba te zjawiska są silnym czynnikiem korozyjnym sprzyjającym obniżeniu trwałości materiału konstrukcyjnego, którym dość często są elementy wykonane z drewna (nawierzchnia, poręcze czy inne elementy wyposażenia). Dodatkowo, jak wspomniano, administracja leśna nie posiada własnych służb utrzymaniowych zajmujących się gospodarką mostową, co prowadzi do systematycznego obniżenia trwałości i nośności obiektów.

4. Studium przypadku

Analizie poddano obiekt mostowy ciągu drogi leśnej nr inw. 242/267, nad potokiem Stryszawka, w Leśnictwie Roztoki, w miejscowości Stryszawa, a działania te podjęto na podstawie ekspertyzy wykonanej celem określenia aktualnej nośności obiektu mostowego przez inżynierów Żemłę i Wyrobka z firmy ATEST SP. Na przykładzie tego obiektu możliwe jest

bezdyskusyjne wykazanie rozdzwienku pomiędzy oceną stanu technicznego wyznaczonego według standardów istniejących, a oceną ekspercką wykazaną na podstawie badań i obliczeń. Obiekt został wybudowany w roku 1975 jako obiekt dwuprzęsłowy, wolnopodparty, o rozpiętości przęseł 6,25 + 12,25 m, szerokości pomostu 4,40 m. Ustrój nośny obiektu tworzy dwuprzęsłowa swobodnie podparta konstrukcja, wykonana w formie dwóch belek prefabrykowanych, w rozstawie osiowym 2,20 m, połączonych z prefabrykowaną płytą pomostu. Wysokość dźwigarów przęsła dłuższego wynosi 0,7 m, a szerokość 0,26 m, natomiast w przęśle krótszym odpowiednio 0,5 i 0,2 m. Płytę pomostu wykonano z prefabrykatów grubości ~0,16 m i szerokości ~1,0 m. Brak w dokumentacji projektowej informacji o uciążleniu prefabrykatów. Zarówno podpory, jak i ustrój nośny wykonano w technologii betonu zbrojonego, zaś na obiekcie ułożono nawierzchnię bitumiczną. Zgodnie z informacjami z dokumentacji projektowej obiekt zaprojektowano na obciążenie użytkowe klasy III według normy [13] oraz sprawdzono na obciążenie wyjątkowe przyczepą niskopodwoziową z ciągnikiem S-100. Zgodnie z ewidencją prowadzoną przez PGLLP obiekt znajduje się w zadowalającym stanie techniczny tzn., że nawierzchnia z ubytkami do 30% powierzchni, przejezdna, wymagająca wykonania prac konserwacyjnych dot. profilowania poboczy lub nawierzchni. W przypadku elementów odwadniających utrzymanie sprowadza się do prac realizowanych punktowo lub na określonych odcinkach. Jest to ocena zdecydowanie pozytywna nie informująca rzetelnie o problemach utrzymaniowych obiektu wykazanych w ekspertyzie [15]. W bieżącym roku przeprowadzono ekspertyzę [15], która wykazała, że sumaryczna ocena ustroju nośnego, obejmująca konstrukcję dźwigarów głównych i pomostu wyniosła 2 (nie dostateczny – wykazuje uszkodzenia obniżające przydatność użytkową, ale możliwe do naprawy), a ocena obejmująca łożyska, izolację, dylatację, system odwodnienia i wyposażenie obiektu miała tę samą wartość. Ponadto zlokalizowano uszkodzenia mające wpływ na nośność obiektu w postaci korozji prętów zbrojeniowych, ubytków betonu, etc. Dopuszczono ruch pojazdów na obiekcie o masie nie przekraczającej 16 ton i ograniczono prędkość pojazdów na obiekcie do 10 km/h. We wnioskach końcowych zalecono pilne wykonanie prac porządkowych mających na celu zatrzymanie degradacji obiektu oraz wykonanie remontu elementów nośnych, przy czym zaznaczono, że optymalnym rozwiązaniem uwzględniającym analizę LCCA jest budowa nowego obiektu [15].

Rys. 2.
Widok
ogólny
obiektu
według
[15]



Rys. 3. Uszkodzenia elementów nośnych obiektu mostowego [15]

5. Podsumowanie

Obiekty mostowe na drogach leśnych stanowią istotny element infrastruktury technicznej i poddawane są intensywnej eksploatacji w trudnych warunkach środowiskowych. Jednocześnie zarządca obiektów nie dysponuje specjalistycznymi służbami, których zadaniem jest utrzymanie właściwego stanu technicznego oraz niedopuszczaniem do przekraczania dozwolonych obciążeń. Na przykładzie konstrukcji mostu w Stryszawie wykazano, że istniejący system ewidencji obiektów mostowych nie oddaje rzeczywistego stanu konstrukcji zarówno w aspekcie utrzymaniowym, jak i zdolności do przenoszenia obciążeń użytkowych. W tej sytuacji wydaje się konieczna zmiana podejścia do zagadnienia wyznaczania stanu technicznego, a szerzej zagadnień związanych z utrzymaniem, obiektów mostowych zlokalizowanych na drogach leśnych ze względu na wykazane niedoskonałości stosowanej obecnie praktyki.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Rocznik Statystyczny Leśnictwa 2024, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa, Białystok 2024
- [2] Lasy w liczbach, Dane dotyczące działalności PGL Lasy Państwowe, Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa, 2024
- [3] Czerniak A., Trzciński G., Zmiany w stanie posiadania dróg leśnych w państwowym gospodarstwie leśnym lasy państwowe, Acta Scientiarum Polonorum Seria Silvorum Colendarum Ratio et Industria Lignaria 15(2)2016, doi:10.17306/J.AFW.2016.2.7
- [4] Czerniak A. (red.), Wytyczne prowadzenia robót drogowych w lasach, Państwowe Gospodarstwo Leśne Lasy Państwowe, Warszawa, 2013
- [5] Rzymska M., Chudzik M., Kościucha B. i inni, Drogi leśne – Poradnik drogowy, Państwowe Gospodarstwo Leśne Lasy Państwowe, Warszawa, 2025
- [6] Trzciński G., Analiza parametrów technicznych dróg leśnych w aspekcie wywozu drewna samochodami wysokotonazowymi, Wydawnictwo SGGW, Warszawa, 2011
- [7] Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r., Prawo budowlane, tekst jednolity (Dz.U. z 2025 r., poz. 418)
- [8] Trzciński G., Tymendorf Ł., Axle load on roundwood truck transport unit in relation to load, set type, season and gross vehicle weight, Drewno 65, 210, 2022, doi: 10.12841/wood.1644-3985.419.08
- [9] Rozporządzenie Ministra Środowiska oraz Ministra Gospodarki z dnia 2 maja 2012 r. w sprawie określenia gęstości drewna (Dz.U. 2012 poz. 536)
- [10] PN-D-95000:2002: Surowiec drzewny – Pomiar, obliczanie miąższości i cechowanie
- [11] Informacja o wynikach kontroli Wykonywanie wybranych zadań przez Inspekcję Transportu Drogowego z uwzględnieniem funkcjonowania Centralnej Ewidencji Naruszeń, NIK, Warszawa, 2015
- [12] Informacja o wynikach kontroli – Wykonywanie zadań Przez zarządców dróg wojewódzkich w zakresie utrzymania, remontów i ochrony dróg, NIK, Warszawa, 2018
- [13] PN-66-B-2015: Mosty, wiadukty i przepusty. Obciążenia i oddziaływania
- [14] PN-85-S-10030: Obiekty mostowe. Obciążenia
- [15] Żemła A., Wyrobek M., Ekspertyza celem określenia aktualnej nośności obiektu mostowego nr inw. 244/260, ATEST SP. J. ul. Matejki 31A 43-600 Jaworzno, 2025

Instalacje fotowoltaiczne na terenach zdegradowanych – uwarunkowania projektowe i ocena wykonalności

Photovoltaic installations on degraded land – design considerations and feasibility assessment

mgr inż. Michał Kosakiewicz (ORCID: 0009-0008-4247-6134), dr inż. Katarzyna Jeleniewicz (ORCID: 0000-0002-7109-2737), prof. dr hab. inż. Eugeniusz Koda (ORCID: 0000-0002-3895-960X), Instytut Inżynierii Lądowej, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, prof. dr hab. inż. Magdalena Daria Vaverková (ORCID: 0000-0002-2384-6207), Instytut Inżynierii Lądowej, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Katedra Ekologii Stosowanej i Krajobrazu, Wydział Nauk Rolniczych, Uniwersytet Mendla w Brnie, mgr inż. Piotr Gołękowski, PG INWEST Sp. z o.o. z siedzibą w Kobyłce k. Warszawy

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7942

Streszczenie: Celem artykułu jest określenie uwarunkowań lokalizacji instalacji fotowoltaicznych na terenach zdegradowanych, ze szczególnym uwzględnieniem składowisk odpadów jako obiektów o ograniczonej dostępności inwestycyjnej i podwyższonych wymaganiach środowiskowych. Praca ma charakter przeglądowo-metodyczny i została uzupełniona eksploracyjnym studium przypadku istniejącej instalacji PV na składowisku odpadów komunalnych w Zakroczymiu, opartym na wizji lokalnej i dokumentacji fotograficznej. Analizę uporządkowano według kryteriów formalno-środowiskowych, geotechnicznych, konstrukcyjnych i eksploatacyjnych. Wyniki wskazują, że powodzenie inwestycji zależy nie tylko od dostępności terenu i parametrów technicznych instalacji, lecz także od zgodności z obowiązkami wynikającymi z wcześniejszego sposobu użytkowania obiektu. Szczególne znaczenie mają zachowanie funkcji ochronnych składowiska, ograniczenie ingerencji w jego warstwy techniczne oraz zapewnienie dostępu do punktów kontrolnych i infrastruktury towarzyszącej przez cały okres eksploatacji. W konsekwencji serwisowalność instalacji należy traktować jako element oceny wykonalności, a nie wyłącznie jako zagadnienie eksploatacyjne. **Słowa kluczowe:** rewitalizacja energetyczna, tereny zdegradowane, instalacje fotowoltaiczne, konstrukcja PV.

Abstract: The objective of this article is to identify the determinants for the siting of photovoltaic installations on degraded land, with a particular focus on landfills as sites characterized by restricted investment accessibility and heightened environmental requirements. The study adopts a methodological review approach, supplemented by an exploratory case study of an existing PV plant located at a municipal landfill in Zakroczym, based on on-site inspections and photographic documentation. The analysis is organized according to formal-environmental, geotechnical, structural, and operational criteria. The results indicate that the success of such investments depends not only on land availability and technical parameters but also on compliance with obligations arising from the site's prior use. Crucial factors include maintaining the landfill's protective functions, minimizing interference with its technical layers, and ensuring continuous access to monitoring points and auxiliary infrastructure throughout the operational period. Consequently, the maintainability of the installation should be considered a fundamental component of the feasibility study rather than a purely operational concern. **Keywords:** energy revitalization, degraded land, photovoltaic installations, PV structures.

1. Wprowadzenie

Rewitalizacja energetyczna terenów zdegradowanych, w szczególności składowisk odpadów, stanowi istotny kierunek rozwoju instalacji fotowoltaicznych w Polsce [1, 2]. Obszary te charakteryzują się ograniczoną przydatnością do zabudowy mieszkaniowej lub przemysłowej. Natomiast z uwagi na istniejącą infrastrukturę, wcześniejsze przekształcenie funkcjonalne oraz często korzystne powiązanie z siecią elektroenergetyczną mogą być wykorzystywane pod instalacje odnawialnych źródeł energii (OZE) [3]. Takie zagospodarowanie umożliwia

przywrócenie funkcji użytkowych terenom wyłączonym z tradycyjnych form użytkowania, a jednocześnie może ograniczać presję inwestycyjną na grunty rolne i obszary o wysokich walorach krajobrazowych [4].

Podstawowym problemem inżynierskim w tego typu lokalizacjach jest specyfika podłoża antropogenicznego, cechującego się niską i zmienną w czasie sztywnością. W przypadku hałd i zwałowisk edometryczny moduł ścisłości E_{oed} przyjmuje zakresy rzędu 0,50-7,00 MPa [5], co wymaga indywidualnej analizy osiadań oraz ostrożnego stosowania uproszczonych metod obliczeniowych właściwych dla gruntów mineralnych.

W konsekwencji dobór posadowienia i podatność układu nośnego stają się istotnymi elementami oceny wykonalności. W praktyce rozważa się zarówno rozwiązania rozproszone, balastowe, jak i pale. Lokalizacje zdegradowane nie eliminują trudności technicznych. Ujawniają one dodatkowe ograniczenia środowiskowe, utrzymaniowe i konstrukcyjne, rzadziej występujące w typowych lokalizacjach inwestycyjnych.

Rewitalizacja energetyczna terenów zdegradowanych nie może sprowadzać się do przeniesienia standardowego projektu instalacji fotowoltaicznej na nowy teren. Zamknięte składowiska odpadów, hałdy i tereny poprzemysłowe mają uwarunkowania wynikające z wcześniejszego sposobu użytkowania. Takie jak niejednorodność warstw, zmienność parametrów podłoża oraz ryzyko osiadań, przemieszczeń i przechyłów konstrukcji. Proces projektowania musi uwzględniać konieczność zachowania ciągłości warstw rekultywacyjnych, ich szczelności oraz sprawności systemów odwadniających [6]. Istotne jest również zapewnienie dostępu do infrastruktury instalacji i punktów monitoringu środowiskowego. Spowodowane jest to tym, że część ograniczeń technicznych ujawnia się dopiero podczas realizacji lub eksploatacji inwestycji.

Znaczenie mają także czynniki społeczne i planistyczne. Na terenach już przekształconych, często ogrodzonych i o ograniczonym dostępie, sprzeciw wobec lokalizacji instalacji OZE bywa słabszy niż w przypadku obszarów dotychczas niezagospodarowanych [7]. Nie oznacza to jednak braku ryzyka konfliktów, ponieważ poziom akceptacji społecznej zależy od lokalnych uwarunkowań przestrzennych i społecznych. Dodatkowym atutem terenów poeksploatacyjnych może być istniejąca infrastruktura drogowa oraz bliskość sieci elektroenergetycznej. Potencjalnie skraca to etap przygotowawczy i ogranicza koszty przyłączenia, choć każdorazowo wymaga weryfikacji na etapie koncepcji. Zagospodarowanie obszarów wyłączonych z produkcji może ponadto sprzyjać uporządkowaniu układu odwodnienia i dróg serwisowych oraz utrzymaniu kontroli nad terenem. W wymiarze planistycznym przeznaczenie gruntów poprodukcyjnych na cele energetyczne w dokumentach miejscowych może ułatwiać rozstrzyganie sporów o przeznaczenie ziemi, łącząc uzasadnienie techniczne z interesem społecznym [7, 8].

Pomimo rosnącego znaczenia takich lokalizacji w praktyce inwestycyjnej brakuje jednoznacznego uporządkowania kryteriów, które pozwalałyby na wstępną ocenę wykonalności instalacji PV na terenach zdegradowanych. Luka ta dotyczy zwłaszcza powiązania wymagań formalno-środowiskowych, geotechnicznych, konstrukcyjnych i eksploatacyjnych w jednej procedurze oceny. Celem niniejszego artykułu jest usystematyzowanie korzyści i barier związanych z rewitalizacją energetyczną nieużytków oraz przedstawienie podejścia do wstępnej oceny wykonalności inwestycji fotowoltaicznych na takich terenach. Analiza koncentruje się na identyfikacji czynników ograniczających ryzyko już na etapie wyboru lokalizacji i opracowania koncepcji przedsięwzięcia, a część przeglądowo-metodyczna została uzupełniona eksploracyjnym studium przypadku istniejącej

instalacji PV na składowisku odpadów komunalnych w Zakroczymiu. Zestawienie najważniejszych korzyści i barier lokalizacji instalacji fotowoltaicznych na terenach zdegradowanych przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Korzyści i bariery lokalizacji instalacji fotowoltaicznych na terenach zdegradowanych

Obszar	Korzyści	Bariery
Formalno-środowiskowy	Przywrócenie funkcji użytkowych terenom zdegradowanym oraz ograniczenie presji inwestycyjnej na grunty rolne i obszary cenne krajobrazowo.	Konieczność zachowania funkcji ochronnych obiektu, w tym warstw rekultywacyjnych, odwodnienia i monitoringu środowiskowego.
Geotechniczny	Możliwość wykorzystania terenów o ograniczonej przydatności dla zabudowy mieszkaniowej lub przemysłowej.	Niejednorodność podłoża antropogenicznego, ryzyko osiadań wtórnych, osiadań różnicowych i utraty stateczności zboczy.
Konstrukcyjno-eksploatacyjny	Możliwość dostosowania konstrukcji i posadowienia do ograniczeń terenu, w tym przez ograniczenie ingerencji w podłoże.	Ograniczony dobór technologii posadowienia, potrzeba zapewnienia dostępu serwisowego i ochrony infrastruktury technicznej.
Społeczno-planistyczny	Potencjalnie słabszy sprzeciw społeczny oraz możliwość uporządkowania sposobu użytkowania terenów poeksploatacyjnych.	Ryzyko konfliktów lokalnych oraz konieczność zgodności inwestycji z dokumentami planistycznymi.

2. Materiały i metody

Analizę przeprowadzono jako opracowanie przeglądowo-metodyczne uzupełnione eksploracyjnym studium przypadku istniejącej instalacji fotowoltaicznej zlokalizowanej na składowisku odpadów komunalnych w Zakroczymiu. Materiał badawczy obejmował literaturę dotyczącą wykorzystania terenów zdegradowanych pod instalacje PV, wymagania odnoszące się do składowisk i obiektów poeksploatacyjnych, dokumentację dotyczącą składowiska odpadów w Zakroczymiu, w tym instrukcję prowadzenia składowiska, ekspertyzy branżowe oraz decyzję właściwego organu sanitarnego [2, 9–11], a także obserwacje z wizji lokalnej wraz z dokumentacją fotograficzną. Dokumenty te wykorzystano pomocniczo, w szczególności do identyfikacji ogólnego charakteru obiektu, jego funkcji, elementów infrastruktury technicznej, zakresu monitoringu oraz wybranych uwarunkowań geotechnicznych, sanitarnych i formalno-administracyjnych. Studium przypadku miało charakter ilustracyjno-diagnostyczny i służyło identyfikacji typowych ograniczeń projektowych oraz eksploatacyjnych, nie stanowiąc pełnej oceny technicznej konkretnej inwestycji.

Rys. 1. Przykładowy schemat układu farmy fotowoltaicznej, opracowanie własne na podstawie [18]

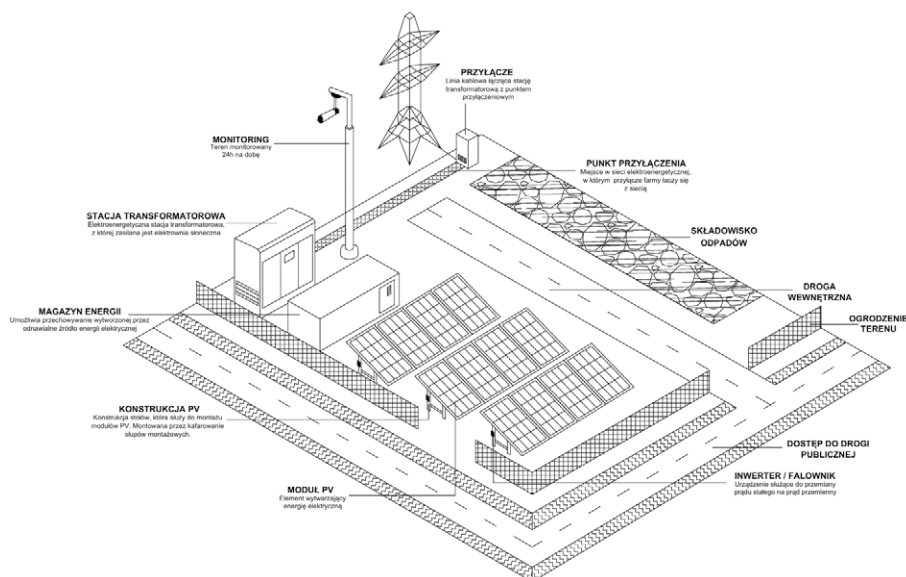
W pierwszym etapie uporządkowano dane wejściowe odnoszące się do lokalizacji instalacji PV na terenach zdegradowanych. Uwzględniono w szczególności wcześniejszy sposób użytkowania terenu, potencjalną niejednorodność podłoża, możliwość występowania warstw rekultywacyjnych i uszczelniających, wymagania dotyczące odwodnienia, dostęp do infrastruktury technicznej oraz konieczność utrzymania punktów monitoringu środowiskowego [6, 12–14].

W przypadku zwałowisk i hałd uwzględniono również wysokość zmienność parametrów okształceniowych materiału zwałowego oraz potrzebę weryfikacji stateczności zboczy, zwłaszcza w warunkach zmiennego uwodnienia [15–17].

W drugim etapie określono kryteria oceny wykonalności inwestycji. Kryteria te podzielono na cztery grupy: formalno-środowiskowe, geotechniczne, konstrukcyjne i eksploatacyjne. Do kryteriów formalno-środowiskowych zaliczono zgodność planowanej funkcji z ograniczeniami wynikającymi z wcześniejszego sposobu użytkowania terenu, zachowanie funkcji ochronnych obiektu oraz utrzymanie dostępu do infrastruktury kontrolnej. Kryteria geotechniczne obejmowały nośność i okształtalność podłoża, przewidywane osiadania, stateczność zboczy oraz wpływ uwodnienia. Kryteria konstrukcyjne dotyczyły sposobu posadowienia, podatności układu wsporczego, ograniczenia ingerencji w warstwy powierzchniowe oraz odporności materiałowej konstrukcji. Kryteria eksploatacyjne obejmowały dostęp serwisowy, utrzymanie odwodnienia, możliwość kontroli punktów monitoringu oraz ograniczenie kolizji z istniejącą infrastrukturą.

W trzecim etapie przeprowadzono analizę ilustracyjno-diagnostyczną instalacji PV w Zakroczymiu. Na podstawie wizji lokalnej i dokumentacji fotograficznej rozpoznano wybrane cechy zagospodarowania terenu, rozmieszczenia konstrukcji wsporczych, przebiegu infrastruktury technicznej oraz dostępności elementów wymagających obsługi. Obserwacje te

Rys. 2. Widok działającego składowiska odpadów komunalnych w Zakroczymiu z instalacją fotowoltaiczną w części zrewitalizowanej (opracowanie własne)



zestawiono z kryteriami wyprowadzonymi z literatury i wymagań dotyczących terenów zdegradowanych. Wnioski formułowano jako uogólnienia metodyczne odnoszące się do wstępnej oceny podobnych lokalizacji.

Odpowiednio przykładowy schematyczny układ farmy fotowoltaicznej oraz widok instalacji zlokalizowanej na składowisku odpadów komunalnych w Zakroczymiu przedstawiono na rysunkach 1 i 2.

3. Wyniki

Przeprowadzona analiza wykazała, że możliwość lokalizacji instalacji fotowoltaicznej na terenie zdegradowanym zależy od jednoczesnego spełnienia warunków formalno-środowiskowych, geotechnicznych, konstrukcyjnych i eksploatacyjnych. Wyniki uporządkowano zgodnie z tymi grupami kryteriów, ponieważ



ograniczenia występujące w jednej z nich mogą istotnie wpływać na zakres dopuszczalnych rozwiązań w pozostałych.

3.1. Uwarunkowania formalno-środowiskowe

Właściwe rozpoznanie ograniczeń terenu przed opracowaniem koncepcji technicznej stanowi warunek dopuszczalności inwestycji na obszarach zdegradowanych. W pierwszej kolejności konieczna jest weryfikacja statusu prawnego nieruchomości. Prawa do dysponowania terenem oraz zgodności zamierzenia z dokumentami planistycznymi. W przypadku składowiska w Zakroczymiu instrukcja prowadzenia obiektu wskazuje m.in. na konieczność utrzymania urządzeń technicznych oraz aparatury kontrolno-pomiarowej związanej z monitoringiem składowiska [2, 9]. W przypadku składowisk odpadów szczególne znaczenie ma zachowanie funkcji ochronnych obiektu, czyli niedopuszczenia do osłabienia warstw rekultywacyjnych, uszczelniających i odwodnieniowych. Wyniki analizy wskazują, że przebieg stref ochronnych, dróg serwisowych oraz korytarzy dostępu do infrastruktury technicznej może ograniczać rozmieszczenie konstrukcji wsporczych, urządzeń elektroenergetycznych i tras kablowych instalacji PV.

3.2. Uwarunkowania geotechniczne

W grupie kryteriów geotechnicznych najistotniejsze są zmienność parametrów warstw antropogenicznych, ryzyko osiadań wtórnych, osiadania różnicowe między podporami oraz stateczność zboczy w przypadku lokalizacji na skarpach. W odniesieniu do składowiska w Zakroczymiu dostępna ekspertyza geotechniczna [10] obejmowała badania terenowe oraz analizy stateczności skarp zrehabilitowanej części składowiska, w kontekście projektowanej farmy fotowoltaicznej zlokalizowanej w odległości około 5 m od krawędzi skarp składowiska. Wyniki analiz wskazały brak bezpośredniego wpływu projektowanej instalacji na warunki stateczności zrehabilitowanej części składowiska. Jednocześnie przykład ten potwierdza, że w przypadku podobnych lokalizacji ocena stateczności skarp i możliwych przemieszczeń podłoża powinna stanowić jeden z elementów wstępnej oceny wykonalności inwestycji. W analizie metodycznej przyjęto, że wartość osiadań różnicowych pomiędzy sąsiednimi podporami powinna być odnoszona do dopuszczalnych przemieszczeń konstrukcji wsporczej, tolerancji systemu montażowego oraz możliwości kompensacji deformacji. Jako kryterium kontrolne można stosować wartość $\Delta s_{lim} = 20$ mm, odpowiadającą typowym zaleceniom ograniczania osiadań różnicowych w stanach użyteczności [19].

3.3. Uwarunkowania konstrukcyjne

Dobór konstrukcji wsporczej i sposobu posadowienia powinien wynikać z ograniczeń podłoża oraz dopuszczalnego zakresu ingerencji w warstwy powierzchniowe. Na terenach zdegradowanych szczególne znaczenie ma ograniczenie ryzyka naruszenia warstw rekultywacyjnych i uszczelniających [10]. Dotyczy to zwłaszcza sytuacji, w których naciski od konstrukcji lub prace montażowe mogłyby wpływać na integralność

warstw ochronnych i elementów uszczelnienia [20, 21]. W zależności od warunków lokalnych możliwe jest stosowanie rozwiązań balastowych, kotwionych, palowych lub mieszanych [2] oraz zróżnicowanych układów konstrukcji wsporczych, w tym belkowych, kratownicowych, stężonych i modułowych [22, 23]. Każdorazowo wymagają one oceny wpływu na funkcje ochronne obiektu. W przypadku składowisk odpadów konstrukcja nie powinna być oceniana wyłącznie przez pryzmat nośności, lecz także podatności układu, możliwości kompensacji przemieszczeń oraz zachowania dostępu do elementów wymagających kontroli. W przypadku Zakroczymia widoczne rozwiązania konstrukcyjne wskazują na znaczenie właściwego rozmieszczenia podpór, tras kablowych i urządzeń pomocniczych względem przestrzeni serwisowej oraz powierzchni biologicznie czynnej.

3.4. Uwarunkowania eksploatacyjne i infrastrukturalne

Wyniki analizy wskazują, że serwisowalność instalacji jest jednym z warunków wykonalności inwestycji na terenach zdegradowanych. Zachowanie funkcji ochronnych obiektu wymaga zapewnienia stałego dostępu do dróg serwisowych, punktów kontrolnych, systemu odwodnienia, infrastruktury technicznej oraz miejsc monitoringu środowiskowego. W odniesieniu do Zakroczymia znaczenie tych elementów potwierdza instrukcja prowadzenia składowiska, w której wyszczególniono m.in. piezometrię, repery geodezyjne, punkty kontroli odcieków, studnie odgazowujące oraz urządzenia techniczne obiektu [9]. Ograniczenia te wpływają na możliwą geometrię stołów montażowych, przebieg tras kablowych i lokalizację urządzeń elektroenergetycznych. Istotne jest również zaplanowanie utrzymania terenu, obejmujące pielęgnację zieleni, kontrolę drożności odwodnienia oraz możliwość prowadzenia prac serwisowych w okresach podwyższonej wilgotności. Na etapie koncepcji należy zatem uwzględnić nie tylko rozmieszczenie modułów PV, lecz także organizację eksploatacji obiektu przez cały okres użytkowania instalacji.

3.5. Procedura wstępnej oceny wykonalności

Wyniki analizy pozwoliły uporządkować procedurę wstępnej oceny wykonalności inwestycji PV na terenach zdegradowanych. Procedura ta obejmuje kolejno rozpoznanie ograniczeń formalno-środowiskowych, identyfikację warunków geotechnicznych, ocenę dopuszczalnych sposobów posadowienia i konstrukcji wsporczej oraz weryfikację wymagań eksploatacyjnych. Szczególne znaczenie ma ustalenie, czy planowana instalacja nie ograniczy funkcji ochronnych obiektu, nie utrudni odwodnienia oraz nie zablokuje dostępu do punktów kontrolnych i infrastruktury technicznej. Wstępna ocena nie może opierać się wyłącznie na wizji lokalnej. Na dalszym etapie przygotowania inwestycji konieczne jest uzupełnienie jej o badania terenowe, rozpoznanie geotechniczne oraz dostępne dane archiwalne, jeżeli są możliwe do pozyskania. Uproszczony schemat postępowania decyzyjnego w przypadku przedsięwzięć PV zlokalizowanych na terenach zdegradowanych przedstawia rysunek 3.

Rys. 3. Schemat blokowy postępowania (opracowanie własne)

3.6. Parametryczna ocena wykonalności

Pozytywny wynik wstępnej procedury pozwala przejść do oceny parametrycznej, w której identyfikuje się wartości progowe wymagające zmiany technologii, ograniczenia zakresu inwestycji albo pogłębionej analizy projektowej. Kryteria te nie zastępują projektu technicznego ani pełnego rozpoznania geotechnicznego. Służą jednak wczesnemu wskazaniu lokalizacji obciążonych podwyższonym ryzykiem. Ostateczna decyzja o realizacji przedsięwzięcia powinna uwzględniać zarówno wartości graniczne parametrów technicznych, jak i obowiązki formalno-środowiskowe związane z utrzymaniem obiektu. Na podstawie przeprowadzonej analizy opracowano zestaw kryteriów służących do wstępnej oceny, czy lokalizacja PV na terenie zdegradowanym wymaga zastosowania rozwiązań alternatywnych lub pogłębionej analizy. Kryteria te zestawiono w tabeli 2. Przekroczenie progu nie oznacza automatycznej rezygnacji z inwestycji, lecz wskazuje na potrzebę dodatkowej weryfikacji projektowej.

4. Dyskusja

Wyniki analizy potwierdzają, że lokalizacja instalacji fotowoltaicznych na terenach zdegradowanych wymaga łącznego rozpatrywania ograniczeń środowiskowych, geotechnicznych, konstrukcyjnych i eksploatacyjnych. W literaturze dotyczącej składowisk odpadów podkreśla się konieczność zachowania funkcji ochronnych okrywy, sprawności odwodnienia oraz ciągłości monitoringu środowiskowego [6, 12–14]. Obserwacje wykonane podczas wizji lokalnej w Zakroczymiu wskazują, że te wymagania mają bezpośrednie przełożenie na rozmieszczenie konstrukcji wsporczych, tras kablowych i urządzeń

pomocniczych. Studium przypadku nie stanowi pełnej oceny technicznej obiektu, ale dobrze ilustruje, że ograniczenia typowe dla składowisk nie dotyczą wyłącznie etapu projektowania. Pozostają istotne również podczas eksploatacji, gdy konieczny jest dostęp do powierzchni rekultywowanej, infrastruktury technicznej i stref serwisowych.

Jednym z dyskutowanych w literaturze problemów jest dobór posadowienia konstrukcji wsporczej. Ryzyko naruszenia warstw uszczelniających i rekultywacyjnych oraz możliwość kolizji z istniejącą infrastrukturą ograniczają stosowanie rozwiązań wymagających ingerencji w podłoże [6]. Z tego względu w analizach koncepcyjnych często rozważa się systemy balastowe, powierzchniowe lub mieszane, które pozwalają ograniczyć ingerencję w warstwy ochronne i kontrolować wartości nacisków przekazywanych na podłoże [6, 12–14, 26]. Nie oznacza to jednak, że rozwiązania palowe są zawsze niedopuszczalne. Ich zastosowanie wymaga wykazania, że nie naruszają warstw krytycznych ani infrastruktury obiektu, a w przypadku mikropali także spełnienia wymagań wykonawczych właściwych dla tej technologii [27]. Przykład instalacji w Zakroczymiu pokazuje rozwiązanie z podporami wprowadzonymi w podłoże, widoczne na rysunku 4a. Obserwacja ta potwierdza, że wybór technologii posadowienia powinien być każdorazowo odnoszony do lokalnych ograniczeń obiektu, a nie rozstrzygany wyłącznie na podstawie ogólnych zaleceń. Znaczenie ma również kształtowanie konstrukcji wsporczej, jej podatność na przemieszczenia podłoża oraz zapewnienie odpowiedniej sztywności przestrzennej. W przypadku cienkościennych profili otwartych istotne jest stosowanie rozwiązań ograniczających podatność skrętną i amplitudy drgań wzbu-

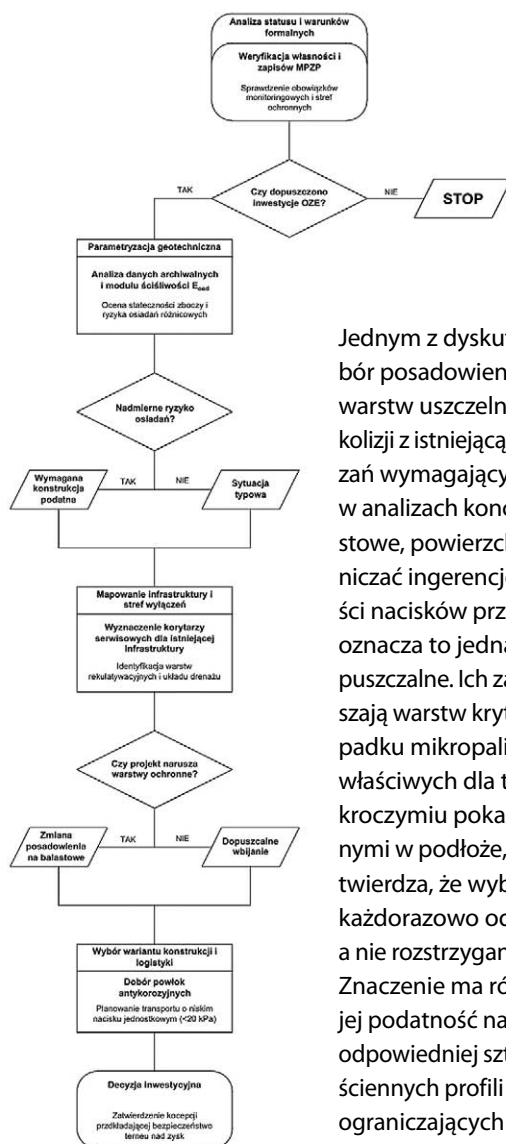


Tabela 2. Parametryczna ocena wykonalności

Parametr techniczny	Wartość krytyczna	Uzasadnienie
Pochylenie zboczy	$> 15^\circ$ [24]	Przekracza wartość graniczną wskazywaną dla instalacji PV na stromych zboczach, dlatego wymaga analizy wariantowej lokalizacji i technologii.
Nacisk jednostkowy	Nacisk kontaktowy przekraczający dopuszczalne wartości dla warstw ochronnych [21].	Wymaga weryfikacji w obliczeniach oraz porównania z ograniczeniami warstw rekultywacyjnych.
Osiadanie wtórne	Wysokie tempo osiadań wtórnych, widoczny trend wzrostowy w monitoringu [25].	Wymagane odniesienie do tolerancji konstrukcji i rozstawu podpór.

dzianych oddziaływaniem wiatru [28, 29]. Literatura wskazuje, że na terenach antropogenicznych należy uwzględniać osiadania wtórne, osiadania różnicowe oraz możliwość nierównomiernej pracy podpór [19, 30–32]. Z tego powodu parametry przemieszczeń powinny być traktowane jako kryterium kontrolne doboru schematu statycznego i systemu montażowego. W analizie metodycznej przyjęto wartość $\Delta s_{lim} = 20$ mm jako konserwatywne

kryterium osiadań różnicowych pomiędzy sąsiednimi podporami [19]. Po przekroczeniu tej wartości zasadne jest rozważenie układów bardziej podatnych oraz połączeń umożliwiających kompensację przemieszczeń bez wprowadzania nadmiernych naprężeń do ram modułów. Widoczne na rysunku 4c połączenie śrubowe może być interpretowane jako przykład detalu, którego geometria i tolerancje montażowe mają znaczenie dla pracy konstrukcji w warunkach możliwych przemieszczeń podłoża [26].

Oddzielnym zagadnieniem jest trwałość materiałowa konstrukcji. W otoczeniu składowisk odpadów mogą występować warunki sprzyjające przyspieszonej korozji elementów stalowych, zwłaszcza przy podwyższonej wilgotności oraz obecności związków siarki i amoniaku. Z tego względu dobór zabezpieczeń antykorozyjnych powinien być poprzedzony oceną kategorii korozyjności środowiska zgodnie z ISO 12944-2 [33], a następnie powiązany z doбором systemu ochronnego odpowiedniego do przewidywanej agresywności środowiska [34]. Literatura i zalecenia materiałowe wskazują, że w środowiskach o podwyższonej agresywności stosuje się powłoki o zwiększonej masie, w tym rozwiązania typu ZM310 lub ZM430 [35]. Wymagania trwałościowe konstrukcji PV są zwykle odnoszone do wieloletniego okresu eksploatacji instalacji, a literatura dotycząca systemów fotowoltaicznych wskazuje również na znaczenie niezawodności oraz etapu końca życia instalacji [36–38]. Dlatego dobór zabezpieczeń materiałowych powinien uwzględniać podatność profili stalowych na degradację w środowisku o podwyższonej agresywności [35].

Obserwacje terenowe wskazują także na znaczenie zagadnień eksploatacyjnych, które w typowych lokalizacjach PV bywają traktowane drugorzędnie. Na rysunku 4b widoczne jest prowadzenie elementów infrastruktury elektrycznej w strefie podmodułowej. Takie rozwiązanie może ułatwiać koncentrację wyposażenia technicznego w obrębie stołów, ale jednocześnie wymaga oceny pod kątem dostępności serwisowej, bezpieczeństwa obsługi oraz potencjalnego zacielenia tylnej strony modułów bifacjalnych. W przypadku instalacji na terenach zdegradowanych układ infrastruktury powinien być więc oceniany nie tylko z perspektywy sprawności energetycznej, lecz także utrzymania, kontroli odwodnienia, pielęgnacji terenu oraz dostępu do punktów monitoringu środowiskowego [39–41].

5. Podsumowanie

Na podstawie analizy przeglądowo-metodycznej, opracowanych kryteriów oceny wykonalności oraz eksploracyjnego studium przypadku instalacji PV na składowisku odpadów komunalnych sformułowano poniższe wnioski dotyczące



Rys. 4. Zastosowane rozwiązania konstrukcyjne farmy fotowoltaicznej na składowisku odpadów komunalnych w Zakroczymiu: a) sposób posadowienia konstrukcji wsporczej, b) infrastruktura elektryczna w strefie podmodułowej, c) połączenie elementów konstrukcji wsporczej (opracowanie własne)

projektowania i realizacji instalacji fotowoltaicznych na terenach zdegradowanych.

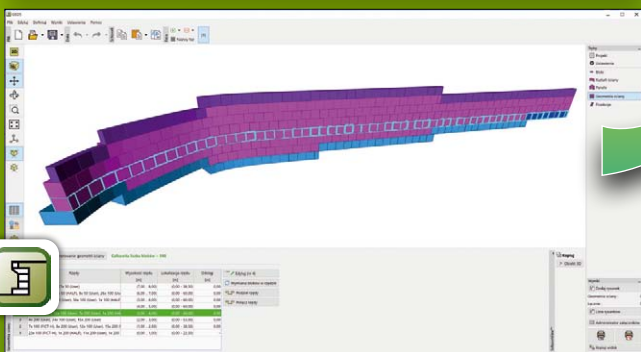
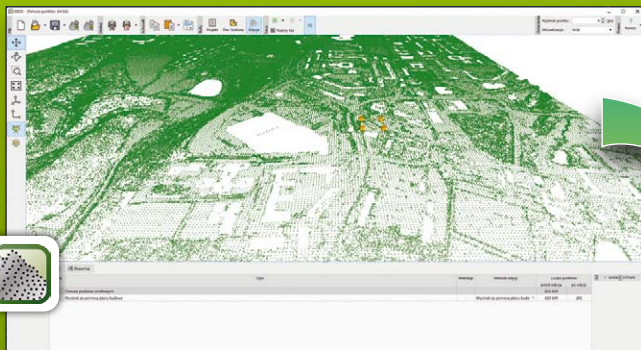
- Rozwiązania typowe dla farm PV lokalizowanych na gruntach rodzimych nie powinny być bezpośrednio przenoszone na podłoże antropogeniczne. Dobór układu konstrukcyjnego i posadowienia powinien wynikać z rozpoznania warunków geotechnicznych, prognozowanej pracy podłoża oraz dopuszczalnych przemieszczeń w czasie.
- Nadrzędnym kryterium formalno-środowiskowym jest niedopuszczenie do pogorszenia funkcji ochronnych obiektu. Obejmuje to zachowanie ciągłości warstw rekultywacyjnych i uszczelniających, sprawności odwodnienia oraz dostępu do infrastruktury technicznej i punktów monitoringu.
- Podwyższone ryzyko formalne, środowiskowe, geotechniczne i eksploatacyjne uzasadnia wykonanie wstępnej oceny wykonalności przed opracowaniem projektu wykonawczego. Kluczowa jest faza przygotowawcza, obejmująca rozpoznanie ograniczeń obiektu, identyfikację stref wyłączeń oraz zdefiniowanie dopuszczalnych wariantów ingerencji.
- W warunkach ograniczonej nośności podłoża oraz ryzyka naruszenia warstw ochronnych uzasadnione jest preferowanie technologii minimalizujących ingerencję w podłoże, w tym rozwiązań balastowych lub mieszanych. Dobór technologii powinien jednocześnie uwzględniać możliwość kompensacji przemieszczeń i korekty geometrii konstrukcji w okresie eksploatacji.
- Ograniczenia w zastosowaniu ciężkiego sprzętu zwiększają znaczenie prefabrykacji, montażu modułowego oraz kontroli wykonawczej. Błędy realizacyjne mogą skutkować uszkodzeniem elementów ochronnych obiektu, ograniczeniem dostępu serwisowego i wzrostem kosztów utrzymania instalacji.
- Rewitalizacja energetyczna terenów zdegradowanych powinna być traktowana jako kierunek komplementarny wobec inwestycji na terenach niezdegradowanych. Warunkiem powodzenia jest zarządzanie ograniczeniami w całym cyklu życia instalacji oraz uwzględnienie dostępnych danych archiwalnych i monitoringowych już na etapie koncepcji.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Kryszk H., Kurowska K., Marks-Bielska R., Bielski S., Eźlakowski B., Barriers and Prospects for the Development of Renewable Energy Sources in Poland during the Energy Crisis, *Energies* 16, 2023, art. 1724, <https://doi.org/10.3390/en16041724>
- [2] Koda E., Vaverkova M. D., Podlasek A., Jakimiuk A., Ekspertyza sanitarna dla składowiska odpadów w miejscowości Zakroczym w związku z pla-

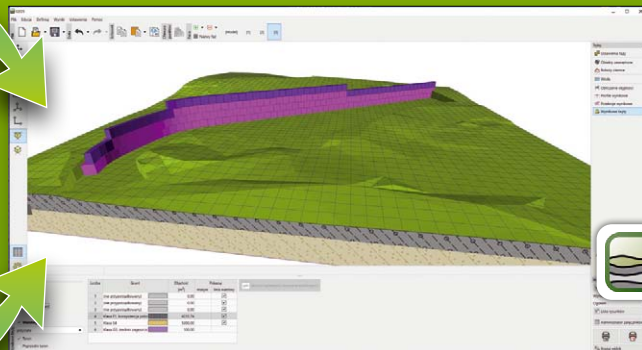
- nową budowę instalacji fotowoltaicznej o mocy 500 kWp na zrekułtywowanej kwaterze składowiska, niepublikowana ekspertyza, 2023
- [3] Hadała W., Rekultywacja składowiska odpadów komunalnych-studium przypadku: wdrożenie instalacji fotowoltaicznej, 2025, doi: 10.15584/pjsd.2025.29.1.4
 - [4] Carvalho F., Lee H. K., Blaydes H., Treasure L., Harrison L. J., Montag H., Armstrong A., Integrated policymaking is needed to deliver climate and ecological benefits from solar farms, *Journal of Applied Ecology* 62(7)2025, str. 1579–1586, <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14745>
 - [5] Slimani R., Dias D., Sbartai B., Oxarango L., Study of the Mechanical Behavior of Municipal Solid Waste Landfill Using a Viscoplastic Constitutive Model, 2021, <https://doi.org/10.22034/jsm.2021.1901384.1602>
 - [6] Zhu M., Ayers M., Solar on Closed Landfills: Engineering Solutions and Case Studies, 2023, <https://doi.org/10.53243/ICEG2023-235>
 - [7] Koelman M., Hartmann T., Spit T. J. M., Squeezing in – Land-use conflicts of urban energy transitions in densification. *disP – The Planning Review* 60(3)2024, str. 40–53, <https://doi.org/10.1080/02513625.2024.2471168>
 - [8] Hu C., Chen Z., Liu P., Zhang W., He X., Bosch D., Impact of large-scale solar on property values in the United States: Diverse effects and causal mechanisms, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 122(24)2025, e2418414122, <https://doi.org/10.1073/pnas.2418414122>
 - [9] PG INWEST Sp. z o.o., Nowa instrukcja prowadzenia składowiska odpadów zlokalizowanego w miejscowości Zakroczym (kwatery wschodnia i południowa), Kobyłka/Zakroczym, styczeń 2017
 - [10] Koda E., Bajda M., Lech M., Rabarijoely S., Jakimiuk A., Ekspertyza geotechniczna dla składowiska odpadów w miejscowości Zakroczym w związku z planowaną budową instalacji fotowoltaicznej o mocy 500 kWp na zrekułtywowanej kwaterze składowiska, niepublikowana ekspertyza, 2023
 - [11] Mazowiecki Państwowy Wojewódzki Inspektor Sanitarny w Warszawie, Decyzja numer DE ZS/00308/2023 z dnia 25 maja 2023 r., Warszawa, 2023
 - [12] Kiatreungwattana K., Mosey G., Jones-Johnson S., Dufficy C., Bourg J., Conroy A., Brown K., 2013, Best Practices for Siting Solar Photovoltaics on Municipal Solid Waste Landfills. A Study Prepared in Partnership with the Environmental Protection Agency for the RE-Powering America's Land Initiative: Siting Renewable Energy on Potentially Contaminated Land and Mine Sites (No. NREL/TP-7A30-52615). National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO (United States); US Environmental Protection Agency (EPA), Washington, DC (United States); SRA; American Association for the Advancement of Science, Washington, DC (United States), <https://doi.org/10.2172/1076646>
 - [13] Sampson G., Solar power installations on closed landfills: Technical and regulatory considerations. Remediation and Technology Innovation Washington, DC, 2009
 - [14] Beswick C., Daye J., Griswold R., He Z., Lively A., Yuan J., Qiming E. Z., Developing Solutions for Brownfield Renewable Energy in Michigan: Compendium for Michigan Department of Environment, Great Lakes, and Energy, 2025, <https://dx.doi.org/10.7302/25483>
 - [15] Zevgolits I. E., Theocharis A. I., Koukoulas N. C., Spatial Variability in Geotechnical Properties Within Heterogeneous Lignite Mine Spoils. *Geosciences* 15(3) 2025, str. 97, <https://doi.org/10.3390/geosciences15030097>
 - [16] Nguyen P. M. V., Wrana A., Rajwa S., Różański Z., Frączek R. Slope stability numerical analysis and landslide prevention of coal mine waste dump under the impact of rainfall – a case study of Janina Mine, Poland. *Energies* 15(21)2022, art. 8311, <https://doi.org/10.3390/en15218311>
 - [17] Wróblewska M., Kowalska M., Łupieżowiec M., Slope stability analysis of post-mining dumps with the use of photogrammetric geometry measurements-a case study, *Archives of Civil Engineering* 4/2023, str. 171–185, doi: 10.24425/ace.2023.147654
 - [18] PST, Jak działa fotowoltaika? Działanie instalacji fotowoltaicznej PST, dostęp: 2 marca 2026, z: <https://pst.pl/jak-dziala-fotowoltaika/>
 - [19] Frank R., Geotechnical aspects of building design (EN 1997)/R. Frank-Brussels, 20–21 October, 2011-55p.
 - [20] Marcotte B. A., Fleming I. R., Design guidance for protection of geomembrane liners in landfill applications, *Canadian Geotechnical Journal* 59(5)2022, str. 743–75, <https://doi.org/10.1139/cgj-2021-0222>
 - [21] Geosynthetic Institute. GRI-GCL5: Standard guide for “Design considerations for geosynthetic clay liners (GCLs) in various applications” (Rev. 1; original January 26, 2011), 2013
 - [22] Iturralde Carrera L. A., Díaz-Tato L., Constantino-Robles C. D., Garcia-Barajas M. G., Zapatero-Gutiérrez A., Álvarez-Alvarado J. M., Rodríguez-Reséndiz J. Advances in Mounting Structures for Photovoltaic Systems: Sustainable Materials and Efficient Design, *Technologies* 13(5)2025, str. 204, <https://doi.org/10.3390/technologies13050204>
 - [23] Kolať K., Maślak M., Pazdanowski M., Zajde P. Mounting of photovoltaic panels supporting structure on transverse frames of a steel hall. *Economics and Environment* 93(2)2025, str. 1093–1093, doi: 10.34659/eis.2025.93.2.1093
 - [24] Al Heib M., Cherkaoui A., Assessment of the Advantages and Limitations of Installing PV Systems on Abandoned Dumps. *Materials Proceedings* 5(1)2021, str. 68, <https://doi.org/10.3390/materials2021005068>
 - [25] Environmental Research & Education Foundation, Implementation of the EPCC methodology for assessment of functional stability: Mohawk Valley Landfill, Frankfurt, New York. Environmental Research & Education Foundation, 2023
 - [26] K2 Systems GmbH. D-Dome 6 System Xpress and Classic. Assembly Manual, Renningen (Germany): K2 Systems GmbH, 2024. D-Dome 6 Assembly EN V7/1124, dostęp: 17.02.2026
 - [27] European Committee for Standardization, EN 14199:2015 Execution of special geotechnical works – Micropiles, CEN, 2015
 - [28] Xia Y., Glauz R. S., Schafer B. W., Seek M., Blum H. B., Cold-formed steel strength predictions for torsion and bending-torsion interaction, *Thin-Walled Structures* 195, 2024, art. 111367, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111367>
 - [29] Fang Z., Zhu Y., Analysis of Wind-Induced Effects and Vibration Control of a Cable-Supported Bridge with a Steel Truss Girder in Strong Marine Wind Environments, *Applied Sciences* 15(22)2025, art. 11950, <https://doi.org/10.3390/app152211950>
 - [30] Dixon N., Whittle R. W., Jones D. R. V., Ng'ambi S., Pressuremeter tests in municipal solid waste: measurement of shear stiffness, *Geotechnique* 56(3)2006, str. 211–222, <https://doi.org/10.1680/geot.2006.56.3.211>
 - [31] Tsang H. H., Tran D. P., Gad E. F. Serviceability performance of buildings founded on rubber-soil mixtures for geotechnical seismic isolation, *Australian Journal of Structural Engineering* 24(4)2023, str. 265–278, <https://doi.org/10.1080/13287982.2023.2230063>
 - [32] Fan Y. H., Kerry Rowe R., Brachman R. W. I., Van Gulck J., Impact of differential settlement on leakage through geomembranes in waste covers. *Geosynthetics International* 32(1)2025, str. 82–93, <https://doi.org/10.1680/jgein.23.00175>
 - [33] International Organization for Standardization, ISO 12944-2:2017 Paints and varnishes – Corrosion protection of steel structures by protective paint systems – Part 2: Classification of environments, ISO, 2017
 - [34] Ivetić Salopek R., Zaštita čeličnih konstrukcija primjenom zaštitnih sredstava premaz, GF: Zbornik radova 22(1)2019, str. 75–90, <https://doi.org/10.32762/zr.22.1.5>
 - [35] Chen T., Shang T., Jiang G., Teng H., Liu W., He X., Liu C., Effect of SO₂ and NH₃ on the corrosion failure of Zn-Al-Mg coatings, *Surface and Coatings Technology* 493, 2024, art. 131244, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.131244>
 - [36] Bošnjaković M., Galović M., Kuprešak J., Bošnjaković T., The end of life of PV systems: is Europe ready for it? *Sustainability* 15(23)2023, art. 16466, <https://doi.org/10.3390/su152316466>
 - [37] Ahmad Ludin N., Ahmad Affandi N. A., Purvis-Roberts K., Ahmad A., Ibrahim M. A., Sopian K., Jusoh S., Environmental impact and levelised cost of energy analysis of solar photovoltaic systems in selected Asia Pacific region: A cradle-to-grave approach. *Sustainability* 13(1)2021, str. 396, <https://doi.org/10.3390/su13010396>
 - [38] Poulek V., Aleš Z., Finsterle T., Libra M., Beránek V., Severov, L., Svoboda R., Reliability characteristics of first-tier photovoltaic panels for agrivoltaic systems-practical consequences, *International Agrophysics* 38(4)2024, str. 383–391
 - [39] California Energy Commission. Appendix H Reclamation Plan – Darden Clean Energy Project, 2023, dostęp: 17.02.2026
 - [40] Rhode Island Department of Environmental Management. Guidance to Developing Solar on Rhode Island Closed Landfills, 2023, dostęp: 17.02.2026
 - [41] Beane Solar Farm – Planning, Design and Access Statement, 2025, dostęp: 17.02.2026

Rzeczywisty obraz placu budowy
z pomiarów dronami lub z baz danych



Projektowanie i weryfikacja
konstrukcji geotechnicznych

Powiązania między
programami



Kompleksowy model 3D placu budowy
i podłoża z możliwością eksportu do BIM



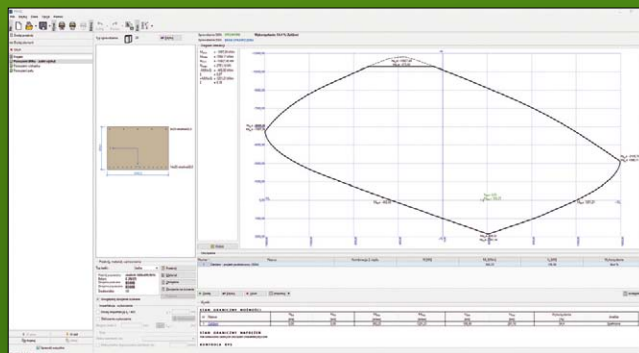
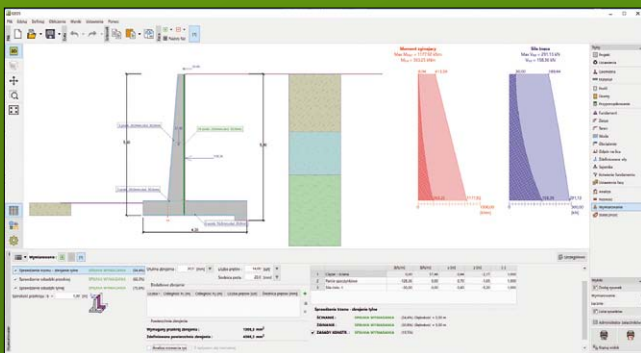
Przekazywanie danych między produktami



Transfer danych do wymiarowania
elementów żelbetowych, stalowych
i drewnianych



Wyznaczanie nośności, zarysowania
i odkształceń konstrukcji
bez ręcznego przenoszenia danych



INTERsoft®

Kompleksowe oprogramowanie BIM dla architektury i budownictwa

Kompleksowy system ArCADia BIM instalacje, konstrukcja, architektura

**RAZEM - JAKO SYSTEM
LUB OSOBNO JAKO POJEDYNCZE PROGRAMY**



AKTUALNE OFERTY:
www.intersoft.pl

NOWA WERSJA ArCADia-TERMOCAD 12

Możliwość automatycznego wypełniania wniosków DPAE dla programu Czyste Powietrze lub zapis do pliku XML.

Nowy, ulepszony sposób komunikacji z modułem graficznym wraz z wizualizacją.

Cztery sposoby wprowadzania parametrów budynku do programu:

1. Bezpośrednio, alfanumerycznie w formularzu wprowadzania danych.
2. Bezpośrednio graficznie w zintegrowanym module CAD.
3. Poprzez eksport z systemu ArCADia BIM.
4. Poprzez eksport z innych programów przez format gbXML.

